

# 不同操作周期下考虑结垢问题的换热网络优化

朱文琦, 王彧斐\*, 冯 霄

(中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249)

**摘要:** 换热网络优化一直是过程系统集成中的研究热点,而换热器结垢是换热过程中不容忽视的问题.基于结垢阈值模型,换热器中的结垢问题可通过流速优化、分流比优化以及清垢周期优化这3种手段进行改善.在某原油常减压预热网络的案例基础上,考虑换热器的结垢及压降问题,在不同的操作周期下分别采用这3种手段,实现对固定结构换热网络的优化.结果表明,3种手段均可不同程度地降低年度总费用,且节能效益随不同的操作周期有所改变.

**关键词:** 结垢;换热网络;操作周期

**中图分类号:** TQ021

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7511/dllgxb201903007

## 0 引言

换热网络是化工节能的重要一环.换热网络中的结垢和压降是换热过程中必须考虑的问题.

近30年来,学者对于换热器中的结垢问题做了大量研究,特别是针对原油的高温结垢,在其结垢的机理、影响因素以及换热器结垢速率的测定和建立预测模型等方面取得了很大进展<sup>[1]</sup>.1995年,Ebert等<sup>[2]</sup>提出了结垢阈值的概念和模型,以半经验的方法量化了流速对管壳式换热器中原油在高温下结垢的影响.2002年,Polley等<sup>[3]</sup>改进结垢阈值模型,用壁温代替膜温,且明确了沉积项的自变量.

对于考虑压降的换热网络优化,Polley等<sup>[4]</sup>指出不考虑压降会导致换热网络优化的总成本和压力约束均偏离最优值.Jegade等<sup>[5]</sup>首先在换热网络设计中考虑压降问题.Zhu等<sup>[6]</sup>将最大压降作为定值计算传热系数.Serna-González等<sup>[7]</sup>的研究中解决了优化范围不足的问题,但并未考虑压降对网络设计的影响,且缺乏对换热网络各换热器的传热系数与压降的统一优化.

关于换热网络的研究一般分为两个方面:对换热网络结构的最优设计和对固定换热网络的优

化改造.在设计阶段,可以增加换热器余量或增加旁路,从而解决结垢引起的换热网络性能下降的问题;而对于现行网络的改造问题,研究多以清垢周期的优化等为出发点.Yeap等<sup>[8-9]</sup>改进了Wilson等<sup>[10]</sup>提出的图示法,但该法并没考虑结垢与网络特性的相互作用.Rodriguez等<sup>[11]</sup>使用模拟退火算法改造原油预热装置.其中,结垢被考虑为一个动态的过程,结垢速率的计算与壁温和流速两个因素有关.Ishiyama等<sup>[12]</sup>论述了结垢的预热系统中换热器的改造方法.田佳阳等<sup>[13]</sup>考虑结垢与压降,对清垢周期的优化进行了初步研究.

另一方面的研究重点在于传热强化技术,从而延缓结垢现象.Pan等<sup>[14-16]</sup>提出改造换热网络的MINLP模型并改进优化算法,结果表明管内插入物可以减缓结垢速率,从而回收更多热量.Wang等<sup>[17]</sup>对比分析了不同的原油在换热网络的性能优化问题,基于模拟退火算法提出一个新的设计方法并进行优化.湛世辉<sup>[18]</sup>考虑结垢、压降问题,对固定结构的换热网络进行流速优化.

还有一些研究提出了改变分流比以减缓并联换热网络结垢现象的方法.De Oliveira Filho等<sup>[19]</sup>对多分支原油预热网络提出了流量调节法,但其研究过程中结垢速率为定值.Assis等<sup>[20]</sup>提

收稿日期: 2018-09-06; 修回日期: 2019-04-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21576286).

作者简介: 朱文琦(1996-),女,硕士生,E-mail: 2016213129@student.cup.edu.cn; 王彧斐\*(1986-),男,博士,副教授,E-mail: wangyufei@cup.edu.cn.

出有限的非线性规划模型来研究原油预热网络中的换热器. Ishiyama 等<sup>[21]</sup>通过技术-经济分析工具对改造前后的原油预热网络性能进行对比.

考虑结垢和压降问题的换热网络优化方法主要有流速优化、分流比优化和清垢周期优化.但目前并没有研究工作系统地分析比较3种优化方法在不同操作周期下的优化效果.本文旨在考虑结垢和压降问题的情况下,研究不同操作周期下3种优化方法的效果.

## 1 定结构换热网络的流速优化

湛世辉<sup>[18]</sup>的研究发现,流速增加,换热网络能量费用和结垢相关费用会降低,而设备投资和动力费用则会增加.即对于单台换热器而言,流速越高,结垢速率越小,传热系数和压降越高;而对于整个换热网络的费用而言,随着流速的不断改变,可以找到一个对应的最小总费用值.因此,本文在考虑结垢问题的情况下,对定结构换热网络的流速优化进行讨论.

所有因为结垢过程产生的变量变化,都可以通过流体流速的改变表示.因而虽然结垢过程、传热系数与压降有着十分复杂的关系,但所有的关系都可以通过流速这一个变量表示.可使用流速作为联系三者之间关系的纽带,从而建立流速优化方程来简单地描述结垢速率( $dR_i/d\tau$ )、总传热系数( $K$ )与压降( $\Delta p$ )随流速( $v$ )变化的规律.

定结构换热网络中,换热器模型其实是基于换热面积的模型.但污垢热阻不是定值,故各换热器的热负荷也不是定值.当冷热流体的出口温度及热负荷都无法确定时,需要通过试差迭代计算相关参数.为省去迭代过程,减小工作量,可使用传热单元(NTU)法计算换热器的工艺参数.

本文采用的结垢阈值模型是 Polley 模型<sup>[3]</sup>,如式(1)所示.其中, $R_i$ 是管内污垢热阻, $\tau$ 是时间, $Re$ 是雷诺数, $Pr$ 是普朗特数, $t_w$ 是换热器壁温, $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $E$ 、 $R$ 都是模型参数.

$$\frac{dR_i}{d\tau} = \alpha Re^{-0.8} Pr^{-0.33} \exp\left(\frac{-E}{Rt_w}\right) - \gamma Re^{0.8} \quad (1)$$

Polley 模型以壁温代替原模型中的膜温.由结垢阈值模型可知,换热器结垢速率与换热器壁温呈正相关,且存在一个结垢边界.因此,可通过改变换热器流速,降低换热器结垢速率,使换热器

远离结垢区域,达到对换热网络的优化.

随着垢层厚度  $\delta$  的增加,真实的管内径不断变小,导致流速增加,从而导致压降增加.本文考虑的压降主要为3部分:直管阻力、局部阻力和流体进出口阻力.直管阻力计算公式如下:

$$\Delta p_i = f \frac{L}{D_i} \frac{\rho v^2}{2} N \quad (2)$$

式中: $L$ 为管长, $D_i$ 为管内径, $\rho$ 为物料密度, $v$ 为流速, $N$ 为换热器管数, $f$ 为摩擦因数.其中  $f$  可通过粗糙管摩擦因数的顾毓珍公式<sup>[22]</sup>计算.

$$f = 0.012 27 + \frac{0.754 3}{Re^{0.38}} \quad (3)$$

局部阻力可通过以下公式计算:

$$\Delta p_r = \xi \frac{\rho v^2}{2} N \quad (4)$$

其中  $\xi$  为局部阻力系数.流体进出口阻力为

$$\Delta p_n = 1.5 \times \frac{\rho v^2}{2} \quad (5)$$

则压降

$$\Delta p = \Delta p_i + \Delta p_r + \Delta p_n \quad (6)$$

得到刚开始结垢时的压降  $\Delta p_0$  以及垢层厚度  $\delta$  后,后续的压降均可以通过下式得出:

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_0} = \Delta p^* = \left(1 - \frac{\delta}{D_i}\right)^{-5} \quad (7)$$

具体换热器的传热速率由 NTU 法计算,在模型中,流速的变化首先影响雷诺数,进而影响到管程传热系数,而管程传热系数是总传热系数  $K$  的影响因素之一,最终会影响换热器换热效果.

因为换热器结垢过程是一个随时间变化的动态过程,为了估计换热器在所研究时间段内性能的变化,可以将整个时间段  $T$  分成  $n$  个时间区间,每个区间时间为  $\tau$ ,如下式所示:

$$\tau = T/n \quad (8)$$

假设每个时间区间中,所有的操作变量为定值,因此在每个时间区间中的换热器模型均视为稳态模型.由于污垢热阻( $R_i$ )随着时间区间不同而有所改变,故可视为各个时间区间之间的联系变量.根据 Polley 结垢模型,通过  $n$  时段流速  $v_n$  下各参数的计算得出时间区间  $n-1$  和  $n$  的污垢热阻  $R_{i,n}$  和  $R_{i,n-1}$ .在得到污垢热阻之后,便可以估计污垢的导热系数并计算得到时间区间  $n$  时的垢层厚度  $\delta_n$ .通过  $\delta_n$  可计算出下一时间区间内的流速  $v_{n+1}$ ,进而可计算出时间区间  $n+1$  内的压

降和对流传热系数,以及下一时间区间内的结垢速率,从而得出下一时间区间内的污垢热阻,再进一步可得下一时间区间内的流速.以此类推,可得出每个时间区间内的各项参数值.

可根据压降计算得出换热网络在操作周期内所需的电费.另外,根据流速改变带来的换热器压降改变,可以计算得出新增泵所需的投资费用.最后,由 NTU 法迭代计算可得实际出入炉温度,从而计算得出换热网络的热公用工程费用.

总费用是随着流速的增加先下降,到流速增大到某值之后,开始增大.故一定存在一个点,在该点流速对应的总费用就是最小总费用.而流速优化的目标就是找到这个最低点所对应的流速值.

## 2 定结构换热网络的分流比优化

此前的研究发现,对多分支的原油预热网络还可以考虑使用流量调节法来延缓关键换热器结垢速率,从而对换热网络进行优化.本文中,考虑通过手动改变并联换热网络中冷流的分流比调节相应的流量,从而延缓关键换热器的结垢速率,提高整体换热网络的性能并进行优化.

分流比改变,对应分支管道的流速随之线性改变,导致结垢速率、压降等一系列参数发生变化,具体计算过程参考流速优化章节.

显然,一定能找到一组不同时间区间内的分流比,使总费用达到最小值.该组数值即为定结构换热网络的分流比优化目标.

## 3 定结构换热网络的清垢周期优化

考虑清垢周期,即意味着在每个时间区间内,换热器都有两个选择:在线工作或是离线清洗.在田佳阳等<sup>[13]</sup>的研究中,引入一个二元变量  $y_{i,n}$  来表示第  $n$  个时段换热器的清洁状况.当  $y_{i,n} = 1$  时,表示第  $n$  个时段内换热器在线工作;当  $y_{i,n} = 0$  时,表示第  $n$  个时段内换热器离线清洗.因此,可进一步将每个时间区间分为清洗时段  $\tau^{\text{cl}}$  和在线时段  $\tau^{\text{pr}}$ ,如图 1 所示.

那么清洗时段和在线时段的污垢热阻可用二元变量的形式表示为

$$R_{fi,n \neq 1}^{\text{cl}} = R_{fi,n-1}^{\text{pr}} + \left. \frac{dR_f}{d\tau} \right|_{i,n-1}^{\text{cl}} \cdot \tau^{\text{cl}} \quad (9)$$

$$R_{fi,n \neq 1}^{\text{pr}} = \left( R_{fi,n-1}^{\text{cl}} + \left. \frac{dR_f}{d\tau} \right|_{i,n-1}^{\text{cl}} \cdot \tau^{\text{pr}} \right) y_{i,n-1} \quad (10)$$

其中  $R_{fi,n}$  和  $R_{fi,n-1}$  分别是时间区间  $n$  和  $n-1$  的污垢热阻.计算步骤同流速优化部分,可得出每个时间区间内的各项参数值.

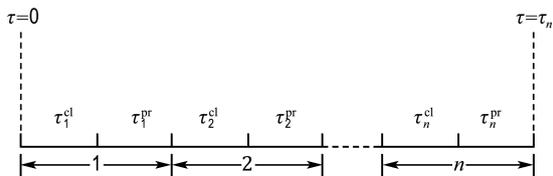


图 1 模型清垢的时间离散化示意图<sup>[13]</sup>

Fig. 1 Schematic of time discretization for modeling cleaning condition<sup>[13]</sup>

清垢周期优化过程中,除温度约束外,还应考虑实际生产,以及减少计算量.对于清垢周期优化,需增加约束条件.首先,同一时间区间内可以限制换热器组合清垢次数,以防止达到加热炉的极限值,计算中应加约束如式(11)所示.此外,同一台换热器不应在相邻的两个时间区间内连续离线清洗,故还应考虑约束如式(12)所示.

$$\sum_i y_{i,n} \geq X \quad (11)$$

$$y_{i,n} + y_{i,n-1} \geq 1 \quad (12)$$

其中  $X$  为最低在线工作换热器数量.

本文的优化目标为总费用最小,具体方程为

$$\min C_t = C_p + C_u + C_o + C_c \sum_n \sum_i y_{i,n} \quad (13)$$

其中  $C_t$  为总费用,  $C_p$  为年化泵投资费用,  $C_u$  为公用工程费用,  $C_o$  为泵的操作费用,  $C_c \sum_n \sum_i y_{i,n}$  为清垢费用.总费用最小处对应的一组清垢周期二元变量,即定结构换热网络的清垢周期优化.

## 4 案例分析

### 4.1 网络结构与相关参数

根据文献[23],本文案例的研究对象为某简化常减压蒸馏装置的原油预热系统,如图 2 所示.

换热器的设计和操作参数如表 1 所示.换热器离线清洗期间,该换热器的冷、热流股分流到上下游相连的设备单元,其他换热器正常在线工作.假设每台换热器清垢费用相同.本案例对固定换热网络的优化从 1 a 到 5 a,共 5 个操作周期,所有操作周期内单元时段均为一个月,对于清垢周期优化来说,清洗时段  $\tau^{\text{cl}}$  和在线时段  $\tau^{\text{pr}}$  均为

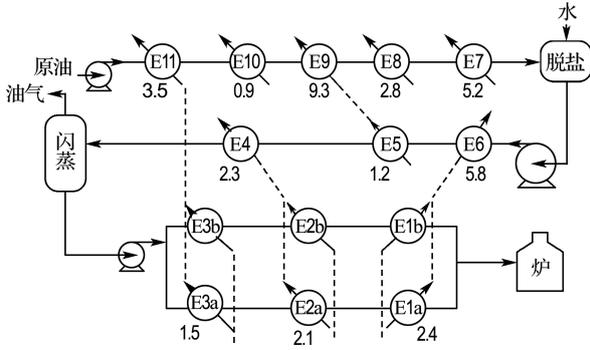


图2 案例原油预热网络

Fig. 2 Crude oil preheat train for the case study

15 d. 取原油比热容为  $2.4 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ , 导热率为  $0.075 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ , 污垢热导率为  $0.002$

$\text{kW}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ . 费用相关的数据<sup>[11,24]</sup> 为电费  $45 \text{ } \$/(\text{MW} \cdot \text{h})$ , 清垢费用  $20\,000 \text{ } \$/\text{次}$ , 热公用工程  $15.5 \text{ } \$/(\text{MW} \cdot \text{h})$ , 泵效率  $70\%$ , 换热器的管内径取  $0.025 \text{ m}$ .

由于各换热器的壁温不同, 结垢机理也不应完全相同, 故将换热网络划分为冷端 (E7~E11) 和热端 (E1~E6). 换热网络冷端的壁温较低, 结垢过程主要为物理沉积, 结垢过程可视结垢速率为一定值; 而换热网络热端的壁温较高, 结垢过程较为严重, 结垢过程应用 Polley 等<sup>[3]</sup> 改进的结垢阈值模型来表示. 模型常数取值为  $E = 48 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $\alpha = 2.4 \times 10^7 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $\gamma = 3.6 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ .

表1 换热器的设计和操作参数

Tab. 1 Design and operating parameters for heat exchangers

换热器	热流		冷流		总传热系数/ ( $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )	换热面积/ $\text{m}^2$
	进口温度/ $^\circ\text{C}$	热容/ $(\text{kW} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	进口温度/ $^\circ\text{C}$	热容/ $(\text{kW} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$		
E1a	334	97.4	210	220.8	0.5	55.6
E1b	334	97.4	210	220.8	0.5	111.2
E2a	286	132.0	191	220.8	0.5	110.3
E2b	286	132.0	191	220.8	0.5	122.6
E3a	249	53.2	178	220.8	0.5	91.0
E3b	249	53.2	178	220.8	0.5	182.0
E4	254	132.0	167	218.5	0.5	67.1
E5	205	145.1	161	218.5	0.5	67.2
E6	285	97.4	135	218.5	0.5	110.1
E7	237	129.2	116	182.4	0.5	121.6
E8	170	129.2	101	182.4	0.5	112.9
E9	197	145.1	50	182.4	0.5	208.3
E10	296	9.6	45	182.4	0.5	8.9
E11	194	53.5	26	182.4	0.5	56.6

## 4.2 案例约束与目标函数

无论流速优化、分流比优化还是清垢周期优化, 为防止加热炉达到加热极限并且保证产量, 都应对原油的入炉目标温度进行约束, 如式(14)所示. 对本案例而言, 由于脱盐罐对原油温度的影响, 脱盐罐上下游换热器的温度关联 E6 和 E7 应加一个额外的温度约束, 如式(15)所示.

$$t_{1,n}^{\text{c,out}} \geq 200 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (14)$$

$$t_{6,n}^{\text{c,in}} = t_{7,n}^{\text{c,out}} - 10 \quad (15)$$

流速优化时, 根据实际炼厂的操作情况, 原油流速优化范围应约束在  $0.5 \sim 3.0 \text{ m/s}$ .

对于清垢周期优化来说, 还应考虑额外的压降约束, 以防换热器压降超过极限值. 本案例考虑 E1~E6 共 9 台换热器的压降, 如下式所示:

$$\sum_{i=1}^9 \Delta p_{i,n} \leq 1.5 \Delta p_0 \quad (16)$$

式中:  $\Delta p_0$  表示热端共 9 台换热器的初始总压降, 当该约束条件不满足时, 意味着这几台换热器必须进行清洗操作.

本案例中目标函数为总费用, 是电费、新增泵投资费用及热公用工程费用、清垢费用之和. 通过 SA 算法对目标函数进行优化分析.

### 4.3 优化结果与分析

本文分别对案例进行不同操作周期的流速优化、分流比优化和清垢周期优化. 总费用在优化前后的结果如图 3 所示, 3 种优化方法的入炉温度如图 4 所示. 可以看到, 在本案例中, 相对于分流比优化而言, 流速优化和清垢周期优化的节能效果更加显著. 另一方面, 在操作周期较短的情况下, 流速优化效果最显著; 而 4 a 及以上的操作周期中, 清垢周期优化的效果最显著. 这是由于结垢造成的换热效率降低是随着时间增加的, 而短期内这种现象不够严重, 在清垢费用和节能效益之间做权衡的结果是倾向于不清垢, 此时流速优化和分流比优化所带来的节能效果更好; 操作周期相对较长的情况下, 结垢问题相对严峻, 清垢成为最优选择. 入炉温度的数据变化即节能效益的直观改变也佐证了这一观点.

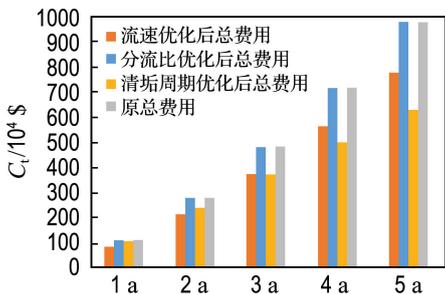


图 3 优化前后的总费用对比

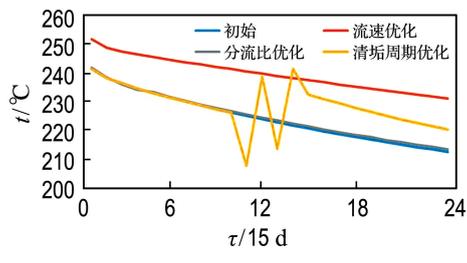
Fig. 3 Total cost before and after optimization

此外, 流速优化下不同换热器内的初始流速分布是有规律的, 如图 5 所示. 第一, 换热器越靠近加热炉, 其初始流速越大. 第二, 随着操作周期的增加, 同一换热器内流速优化值随之相应增加. 这是由于结垢速率随着壁温增加而上升, 热端换热器的结垢现象更严重, 增加流速有利于减小结垢速率, 减轻结垢带来的影响; 操作周期越长, 结垢带来的损失越大, 同理, 初始流速大的换热器会相应减轻结垢损失, 从而有利于整个换热网络的运行.

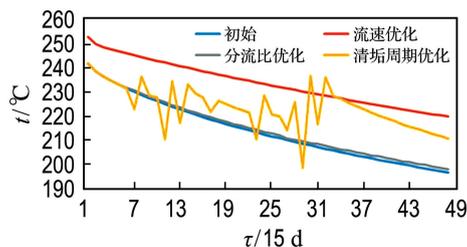
分流比优化下的不同时段内的分流比分布如图 6 所示. 可以看到, 总体分流比变化范围在 0.5~1.0, 且随着操作周期的增加, 分流比优化值波动幅度变大.

对于清垢周期优化, 操作周期从 1 a 到 5 a 时, 换热器离线清垢的次数分别为 4、11、21、35、49 次. 离线清垢的换热器多集中于热端, 离线清

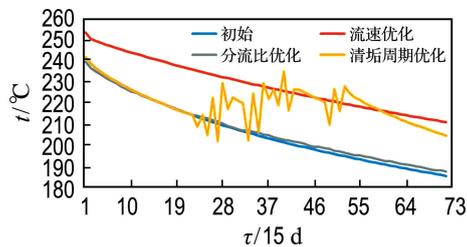
垢的时段则多集中分布在操作周期的中段, 且换热器离线清垢次数随着操作周期增加而增加. 这是清垢费用及离线带来的能量损失与结垢造成的能耗之间权衡结果.



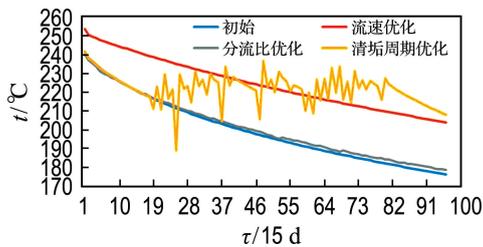
(a) 1 a



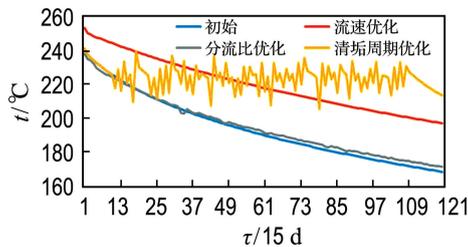
(b) 2 a



(c) 3 a



(d) 4 a



(e) 5 a

图 4 操作周期内的入炉温度

Fig. 4 FIT profiles for operation periods

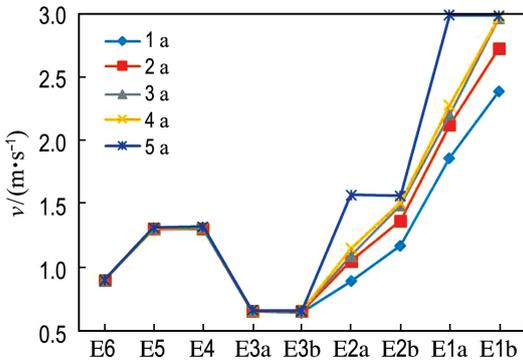


图5 换热器流速分布

Fig. 5 Flow rate distribution of heat exchangers

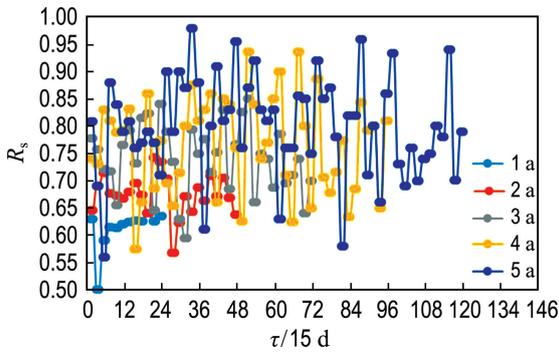


图6 换热器分流比分布

Fig. 6 Split ratio distribution of heat exchangers

## 5 结语

本文采用 Polley 结垢速率预测模型,针对常减压原油预热系统中的各个换热器在操作周期内的结垢速率,利用 NTU 法,在考虑压降和结垢的影响下,分别考察了流速优化、分流比优化与清垢周期优化这 3 种优化方法,并进行了对比分析。

流速优化和清垢周期优化的节能效果优于分流比优化,操作周期较短时流速优化效果优于清垢周期优化,而中长操作周期内清垢周期优化效果最显著。

显然,清垢周期优化和流速优化手段的技术经济性能很好,有望在工业中推广使用。清垢周期优化手段的使用限制主要在于操作周期是否足够长,而流速优化手段在实际应用中,由于实际生产过程中可能出现的流速调节,可能会偏离最优值。

## 参考文献:

[1] 赵辉,陈宏刚,陈新国,等.常减压装置换热器中原油的高温结垢研究进展[J].计算机与应用化学,2010,27(4):546-550.  
ZHAO Hui, CHEN Honggang, CHEN Xinguo,

*et al.* Review on crude fouling under high temperature in CDU preheat train [J]. **Computers and Applied Chemistry**, 2010, 27(4):546-550. (in Chinese)

- [2] EBERT W, PANCHAL C B. Analysis of Exxon crude-oil-slip stream coking data [R]. Illinois: Argonne National Laboratory, 1995.
- [3] POLLEY G T, WILSON D I, YEAP B L, *et al.* Evaluation of laboratory crude oil threshold fouling data for application to refinery pre-heat trains [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2002, 22(7):777-788.
- [4] POLLEY G T, SHAHI M H P. Interfacing heat exchanger network synthesis and detailed heat exchanger design [J]. **Chemical Engineering Research and Design**, 1991, 69(6):445-457.
- [5] JEGEDE F O, POLLEY G T. Optimum heat exchanger design [J]. **Chemical Engineering Research and Design**, 1992, 70(A2):133-141.
- [6] ZHU X X, NIE X R. Pressure drop considerations for heat exchanger network grassroots design [J]. **Computers and Chemical Engineering**, 2002, 26(12):1661-1676.
- [7] SERNA-GONZÁLEZ M, PONCE-ORTEGA J M. Total cost target for heat exchanger networks considering simultaneously pumping power and area effects [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2011, 31(11/12):1964-1975.
- [8] YEAP B L, WILSON D I, POLLEY G T, *et al.* Mitigation of crude oil refinery heat exchanger fouling through retrofits based on thermo-hydraulic fouling models [J]. **Chemical Engineering Research and Design**, 2004, 82(A1):53-71.
- [9] YEAP B L, WILSON D I, POLLEY G T, *et al.* Retrofitting crude oil refinery heat exchanger networks to minimize fouling while maximizing heat recovery [J]. **Heat Transfer Engineering**, 2005, 26(1):23-34.
- [10] WILSON D I, POLLEY G T, PUGH S J. Mitigation of crude oil preheat train fouling by design [J]. **Heat Transfer Engineering**, 2002, 23(1):24-37.
- [11] RODRIGUEZ C, SMITH R. Optimization of operating conditions for mitigating fouling in heat exchanger networks [J]. **Chemical Engineering Research and Design**, 2007, 85(A6):839-851.
- [12] ISHIYAMA E M, PUGH S J, KENNEDY J, *et al.* An industrial case study on retrofitting heat exchangers and revamping preheat trains subject to fouling [C] // **Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning -**

2013. Budapest: Heat Transfer Research, Inc., 2013:27-35.
- [13] 田佳阳, 贾林权, 王彧斐, 等. 考虑关键换热器备用的原油预热系统清垢周期优化 [J]. 化工学报, 2016, **67**(12):5183-5189.
- TIAN Jiayang, JIA Linquan, WANG Yufei, *et al.* Schedule optimization for fouling removal in refinery heat exchanger networks with backup unit [J]. **CIESC Journal**, 2016, **67**(12): 5183-5189. (in Chinese)
- [14] PAN Ming, BULATOV I, SMITH R, *et al.* Novel MILP-based iterative method for the retrofit of heat exchanger networks with intensified heat transfer [J]. **Computers and Chemical Engineering**, 2012, **42**:263-276.
- [15] PAN Ming, BULATOV I, SMITH R. Exploiting tube inserts to intensify heat transfer for the retrofit of heat exchanger networks considering fouling mitigation [J]. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, 2013, **52**(8):2925-2943.
- [16] PAN Ming, BULATOV I, SMITH R. New MILP-based iterative approach for retrofitting heat exchanger networks with conventional network structure modifications [J]. **Chemical Engineering Science**, 2013, **104**:498-524.
- [17] WANG Yufei, SMITH R. Retrofit of a heat-exchanger network by considering heat-transfer enhancement and fouling [J]. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, 2013, **52**(25): 8527-8537.
- [18] 湛世辉. 固定结构换热网络的流速优化 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
- ZHAN Shihui. Flow velocity optimization in fixed heat exchanger network structure [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016. (in Chinese)
- [19] DE OLIVEIRA FILHO L O, LIPORACE F S, QUEIROZ E M, *et al.* Investigation of an alternative operating procedure for fouling management in refinery crude preheat trains [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2009, **29**(14/15): 3073-3080.
- [20] ASSIS B C G, GONCALVES C D O, LIPORACE F S, *et al.* Constrained thermohydraulic optimization of the flow rate distribution in crude preheat trains [J]. **Chemical Engineering Research and Design**, 2013, **91**(8):1517-1526.
- [21] ISHIYAMA E M, PATERSON W R, WILSON D I. Platform for techno-economic analysis of fouling mitigation options in refinery preheat trains [J]. **Energy and Fuels**, 2009, **23**(3):1323-1337.
- [22] GU Y. Friction factor of fluids in pipes [J]. **Chemical Engineering (New York)**, 1936, **3**:3-14.
- [23] SMAÏLI F, VASSILIADIS V S, WILSON D I. Mitigation of fouling in refinery heat exchanger networks by optimal management of cleaning [J]. **Energy and Fuels**, 2001, **15**(5):1038-1056.
- [24] PANJESHAHI M H, TAHOUNI N. Pressure drop optimisation in debottlenecking of heat exchanger networks [J]. **Energy**, 2008, **33**(6):942-951.

## Heat exchanger network optimization considering fouling under different operation periods

ZHU Wenqi, WANG Yufei\*, FENG Xiao

(State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

**Abstract:** Optimization of heat exchanger networks in process integration has been studied for many years. Fouling has a great impact on heat transfer in a heat exchanger. Based on fouling threshold model, fouling problem can be eased by three methods - flow rate optimization, split ratio optimization and cleaning schedule optimization. A case of crude oil preheat train is used to illustrate the effectiveness of the methods. In the case study, both fouling and pressure drop problem are considered. The three methods are used to optimize the fixed heat exchanger network under different operation periods. It turns out that the three methods can effectively reduce the total expenses and the amount of saved energy changes with different operation periods.

**Key words:** fouling; heat exchanger network; operation periods