

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.03.009

考虑碳排放的换热网络烟经济学优化

李林¹, 蒋宁^{2*}, 尹凤福¹, 汪传生¹

(1. 青岛科技大学机电工程学院, 山东 青岛 266061; 2. 浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310032)

摘要: 换热网络是过程工业中能量回收的重要系统,其设计水平的高低直接决定了过程系统的能耗和经济性。为了准确计算换热网络的烟损失,笔者研究了换热网络优化设计中的流动烟损求解方法和碳排放量计算方法,将碳排放、流动烟损失和传热烟损失因素加入优化目标函数,以此确定换热网络最佳的最小传热温差值,提出了考虑碳排放的换热网络烟经济学优化方法。将文中方法获得的结果与传统夹点分析法结果进行比较,结果表明考虑碳排放的烟经济学优化方法是有效实用的,为低能耗、低碳排放的换热网络设计提供了参考。

关键词: 换热网络;烟经济学分析;流动烟损;碳排放;优化

中图分类号:TK124

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2018)03-0046-05

Exergoeconomic Optimization of Heat Exchanger Networks Considering Carbon Emissions

LI Lin¹, JIANG Ning^{2*}, YIN Fengfu¹, WANG Chuansheng¹

(1. College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao, Shandong 266061, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: As an important energy recovery system of process industry, the heat exchanger network (HEN) design directly determines the level of energy recovery and the economy of system. In order to calculate exergy loss of HEN (heat exchanger network) exactly, the calculation methods of flow exergy loss and carbon emissions were studied in this paper. The carbon emissions, flow exergy loss and heat transfer exergy loss were involved in the optimization object function to determine the best minimum heat-transfer temperature difference of HEN. The exergoeconomic optimization method of HEN considering carbon emissions was presented. The results of the presented method and pinch analysis method were discussed. Case studies demonstrate the effectiveness and application prospect of the presented method and provide a reference for the design of heat exchanger network with low energy consumption and low carbon emission.

Keywords: heat exchanger network; exergoeconomic analysis; flow exergy loss; carbon emissions; optimization

换热网络优化已有近四十年的研究历史,相关学者取得了不少成果^[1]。目前的研究通常以冷、热公用工程的能耗费用作为换热网络优化目标函数的一部分,这种从热力学第一定律角度计算换热网络能耗费用的方法忽视了能量在品质上的差别。根据热力学第二定律,在换热网络中消耗的仅是能量中的烟,即可用能。烟是传热过程的推动力,也正是由于烟的损耗才

推动了传热过程的进行。因此,一些学者提出从烟分析和烟经济学的角度对换热网络优化问题进行研究^[2-3]。

换热器的烟损失主要包括:有限传热温差所引起的烟损失 ΔE^H 和流体流动的阻力所引起的烟损失 ΔE^F 。压力烟部分可直接通过膨胀转化为有用功,而传热烟只有系统与环境间存在力不平衡时,才能直接

收稿日期:2017-07-26;修回日期:2018-03-10

基金项目:国家自然科学基金(51575287);山东省自然科学基金(ZR2016XJ003)。

第一作者简介:李林(1987),男,山东莒南县人,博士,讲师,主要从事换热网络优化、机电产品绿色设计与制造。E-mail:li_lin1987@126.com

转变为有用功,所以压力焓比传热焓使用价值更高。因此,流体流动的阻力引起的焓损失 ΔE^F 也是换热网络优化的重要影响因素。由于在换热网络初始设计阶段,不涉及网络中换热单元的具体结构,难以准确求解系统的流动阻力损失,因此流动焓损的计算是求解换热网络总焓损失的一个难点。尹清华等^[4]基于焓分析理论对换热网络优化设计做了初步探索。针对换热网络流动焓损的求解主要有两种方法:一是李志红等^[5]对各匹配单元传热系数和压降之间进行优化来求解;二是Zhu等^[6]利用泵/压缩机系统的费用间接代替流动焓损费用。

目前的研究缺乏在换热网络优化过程中考虑碳排放因素。刘霞^[7]对煤制甲醇过程的低温余热利用工艺和碳减排集成工艺进行了评价分析,将碳捕集技术应用于煤制甲醇的余热回收过程。

为了更准确的计算换热网络流动焓损失,笔者研究了换热网络流动焓损的求解方法,并在换热网络优化设计中初步考虑碳排放因素,提出了考虑碳排放的换热网络焓经济学优化方法。最后通过案例对提出方法进行分析 and 讨论。

1 换热网络流动焓损失求解

基于焓经济学进行换热网络优化,首要问题是准确计算换热网络焓损,焓损失的准确求解与否决定了优化结果是否更接近最优解。这个问题主要分为两个方面:一是换热网络传热焓损的求解;二是换热网络流动焓损的求解。传热焓损的计算目前已比较成熟,笔者采用文献[8]中的方法来计算换热网络传热焓损,换热器传热焓损失

$$\Delta E^H = T_0 U A \Delta T_{LM} (T_H - T_C) / (T_C T_H). \quad (1)$$

式中: ΔT_{LM} 是对数平均传热温差,且有

$$\Delta T_{LM} = \frac{T_1 - T_2}{\ln(T_1/T_2)},$$

$$T_1 = T_{H,in} - T_{C,out}, T_2 = T_{H,out} - T_{C,in}.$$

式中: T_0 为环境温度; T_C, T_H 分别为温区间冷端和热端温度; $T_{H,in}, T_{H,out}$ 分别为热流进口、出口温度; $T_{C,in}, T_{C,out}$ 分别为冷流进口、出口温度; U 为总传热系数; A 为换热面积。

流动焓损的求解是准确求解换热网络总焓损失的关键。管壳式换热器是化工和其他过程工业应用最为广泛的换热器,因此我们选择管壳式换热器来研究换热器中的流动焓损失。相关学者研究发现,在换热器的冷热流股换热过程中,压降和传热系数、换热面积之间存在着一定的关系。Polley等^[9]提出了

$$\Delta P = K A h^m. \quad (2)$$

式中: ΔP 为压降; K 是常数,与流体的比热容 c_p 、密度 ρ 、黏度 μ 及热导率 λ 有关; h 为流体的膜传热系数; m 为与换热器的几何结构有关的系数。

以逆流管壳式换热器为例,管程和壳程有

$$\Delta P_1 = K_1 A h_1^{3.5}; \quad (3)$$

$$\Delta P_2 = K_2 A h_2^{5.1}. \quad (4)$$

式中: $\Delta P_1, K_1, h_1$ 表示管程的压降,常数和膜传热系数; $\Delta P_2, K_2, h_2$ 表示壳程的压降,常数和膜传热系数;管程和壳程常数 K_1 和 K_2 的计算详见文献[10]。

流动阻力损失为机械能损失,流动阻力损失即为流动焓损失,而流动阻力损失与压降 ΔP 是成正比的,即 $\Delta E^F \propto \Delta P$ 。由公式(3)和(4)可得换热器的流动焓损为:

$$\Delta E^F = V_1 \Delta P_1 + V_2 \Delta P_2 = (V_1 K_1 h_1^{3.5} + V_2 K_2 h_2^{5.1}) A. \quad (5)$$

式中: V_1, V_2 分别是管程、壳程的体积流量。

由公式(1)和(5)式消去 A 得到

$$\frac{\Delta E^F}{\Delta E^H} = \frac{T_H T_C (V_1 K_1 h_1^{3.5} + V_2 K_2 h_2^{5.1})}{T_0 U \Delta T_{LM} (T_H - T_C)}. \quad (6)$$

2 换热网络碳排放量计算

随着温室效应加剧,减少二氧化碳排放的研究成为热点。换热网络优化设计的主要目的是减少能量损耗及二氧化碳排放。工业使用的燃料(煤、石油、天然气)都含有碳,燃烧过程都会伴随二氧化碳的产生,能量的消耗与二氧化碳的排放量有密切的关系,能量消耗量越大,二氧化碳排放量越多。增加换热网络热回收量,将会减少额外公用工程的用量,降低燃料消耗,二氧化碳的排放也随之减少。因此,要减少换热网络系统的二氧化碳排放量,应提高换热网络的能量回收水平。笔者在换热网络优化目标函数中考虑碳排放因素以促进能量回收并减少二氧化碳的排放。传统夹点方法的目标函数为

$$C_t = C_U + C_I. \quad (7)$$

式中: C_t 为换热网络总年度费用; C_U 为公用工程消耗费用; C_I 为设备投资费用。

笔者考虑碳排放因素的焓经济学优化方法目标函数为

$$C_t = C_H + C_F + C_I + C_{em} = C_{Ex} + C_I + C_{em}. \quad (8)$$

式中: C_H 为换热网络传热焓损费用; C_F 为流动焓损费用; C_{Ex} 为换热网络总焓损费用; C_{em} 为碳排放费用,目标函数中 $C_{em} = E_{m_{CO_2}} \times C_{tax}$,其中 C_{tax} 为碳税价格, $E_{m_{CO_2}}$ 为二氧化碳排放量。

传统过程工业中的常用公用设备有锅炉、透平及熔炉等。换热网络的碳排放量主要指提供公用工程消耗的燃料燃烧所排放的二氧化碳。文中以工业用煤作为基础燃料,假设使用设备为锅炉,则换热网络的碳排放量

$$E_{\text{mco}_2} = 3.67xQ_{\text{fuel}}/N_{\text{HV}} \quad (9)$$

式中: Q_{fuel} 为燃料燃烧热负荷; N_{HV} 为燃料的净燃烧热值; x 为燃料的碳质量分数。

$$Q_{\text{fuel}} = \frac{Q_{\text{Proc}}}{\lambda_{\text{Proc}}} (h_{\text{Proc}} - 419) \frac{T_{\text{FTB}} - T_0}{T_{\text{FTB}} - T_{\text{Stack}}} \quad (10)$$

式中: Q_{Proc} 为过程需要的热负荷; λ_{Proc} 为传至过程的蒸汽潜热; h_{Proc} 为传质过程的蒸汽焓值; T_{FTB} 为锅炉燃气火焰温度; T_{Stack} 为烟气温度。

锅炉的二氧化碳排放量可由式(9)和(10)计算得到^[11]。

3 案例分析

本案例中共含有2条热流股、2条冷流股、1条加热公用工程流股和1条冷却公用工程流股,其中流股数据引自文献[12]。流股数据及物性参数分别如表1

和表2所示。表1中,H1,H2为热流股,C1,C2为冷流股,HU为加热公用工程流股(蒸气),CW为冷却公用工程流股(冷却水)。本案例假设热流体走换热器管程,冷流体走壳程。换热器费用为40 000 + 500A,投资利率为15%,投资周期为5 a,操作时间为8 400 h/a,环境温度25℃,电能和流动烟损单价分别为0.05和0.06 USD·kW⁻¹·h⁻¹,热公用和冷公用单价分别为120和10 USD·kW⁻¹·a⁻¹,净燃烧热值为30 000 kJ/kg,碳税价格10 USD/t,燃料中碳质量分数为74.5%,锅炉效率为80%。

表1 流股数据

Table 1 Steam data

物流序号	初温/℃	终温/℃	热容速率/ (kW·℃ ⁻¹)	传热膜系数/ (kW·m ⁻² ·℃ ⁻¹)
H1	250	40	150	1.0
H2	200	80	250	0.8
C1	20	180	200	1.2
C2	140	230	300	0.8
HU	240	239	—	3.0
CW	20	30	—	1.0

表2 流股物性参数

Table 2 Physical properties of steams

物流序号	比热容/(J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)	黏度/(g·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	热导率/(W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	流量/(kg·s ⁻¹)
H1	1 658	716	0.24	0.12	90.5
H2	2 684	777	0.23	0.24	93.1
C1	2 456	700	0.23	0.12	81.4
C2	2 270	680	0.23	0.03	132.2
HU	1 986	824	0.29	0.14	16.3
CW	4 200	1 000	1.00	0.60	20.4

图1所示为夹点法得到的最小传热温差与总年度费用关系图。用传统夹点分析法对本案例进行优化,得到最佳的最小传热温差 ΔT_{minopt} 为9.7℃。图2所示为本文方法获得的最小传热温差与总年度费用关系。笔者考虑碳排放的烟经济学优化方法计算得到的 ΔT_{minopt} 为7.9℃。表3所示为夹点分析法与本文方法优化结果。由表3可知,与传统夹点分析方法相比,本文方法优化得到的 ΔT_{minopt} 更低,系统回收的热量更多,换热网络中的传热烟损失也就更小。因此,采用烟分析方法更有利于提高传热过程的能量利用效率,其代价是传热面积及传热单元数增加。采用本文方法,优化计算后得到的总年度费用最小的换热网络超结构,对超结构松弛后的网络结构如图3所示的,所需换热器数量为10台,换热面积为6 021 m²,与夹点法优

化得到的换热面积接近,公用工程消耗量不变。

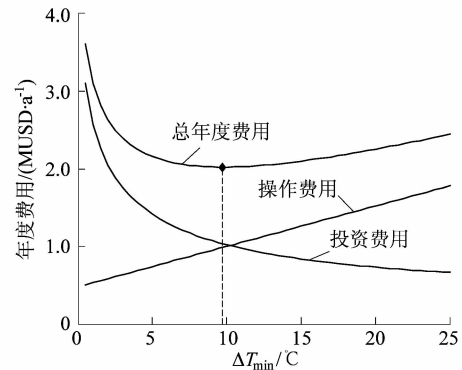


图1 夹点法的最小传热温差与费用关系
Figure 1 Relationship between total annual cost and ΔT_{min} by pinch method

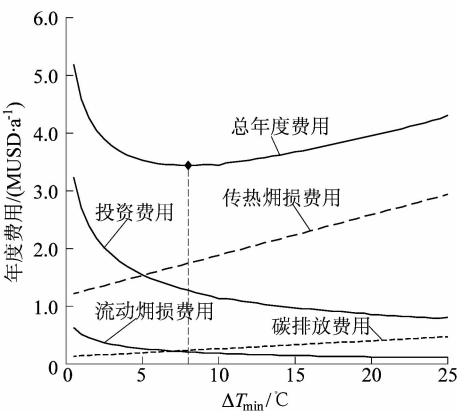


图2 本文方法最小传热温差与费用关系
Figure 2 Relationship between total annual cost and $\Delta T_{\min}$ by proposed method

表3 夹点分析法与本文方法优化结果
Table 3 Results with different methods

方法	夹点温度/°C	热公用/kW	冷公用/kW	回收热量/kW	换热面积/m²	CO ₂ 排放量/(t·a ⁻¹)
夹点法	144.9	7 385	9 885	51 616	6 384	25 441
本文方法	143.9	6 675	9 175	52 326	7 097	22 995

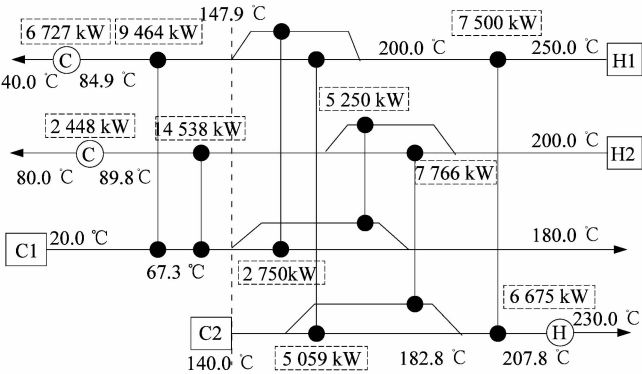


图3 松弛后的网络结构
Figure 3 HEN after relaxation

3.1 碳排放量对比分析

随着当今碳排放交易市场的发展,换热网络优化设计将碳排放作为一项新的权衡因素来考虑是十分必要的。如果在原夹点分析方法得到的 $\Delta T_{\min \text{opt}} = 9.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处考虑碳排放因素进行换热网络优化设计,其碳排放量为25 441 t/a。对比分析表3中数据,本文方法优化得到的换热网络碳排放量为22 995 t/a,比夹点分析方法得到的换热网络碳排放量减少约9.6%。可见增加碳排放目标的情况下,其公用工程消耗以及碳排放量均比夹点分析设计法最优处($\Delta T_{\min \text{opt}} = 9.7\text{ }^{\circ}\text{C}$)处有明

显降低。在该案例中,传统夹点分析方法总年度费用的计算基于能量消耗费用,本文方法的总年度费用计算基于焓消耗费用,2种方法获得的总年度费用并不具备可比性。在当前更加注重企业生产环境影响的形势下,考虑碳排放因素是合理的,更接近换热网络设计的实际情况。

3.2 焓经济学分析

夹点分析法(从能量守恒的角度)得到的操作费用与设备投资费用之间的关系如图4所示。当同时考虑换热网络传热和流动焓损时,其换热网络总焓损费用与投资费用的关系如图5所示,其趋势与图4所示的夹点分析法的趋势不同,焓损费用有极小值。换热网络总焓损费用与投资费用的关系曲线图:其左半部分,随着投资费用增大焓损费用随之减小,与图4所示趋势一致,此阶段投资费用较小, $\Delta T_{\min}$ 较大,传热焓损占主导地位;右半部分,随着投资费用的增大焓损费用也随之增大,此阶段 $\Delta T_{\min}$ 较小时,网络总面积变大,其流动焓损也随之变大,此时流动焓损占主导地位。因流动焓损的变化趋势与投资费用近似,此时换热网络总焓损费用与投资费用呈正相关趋势。由图5可知,并不是投资费用越大,焓损费用就越低,换热网络的总焓损费用存在极小值,极小值是由换热网络的流动焓损费用与传热焓损费用之间的权衡决定的。极小值与流动焓损与传热焓损的比重、流动与传热焓损的单价比等因素密切相关。这表明盲目地通过增加传热面积、增加单元数等措施进行节能是不可取的。

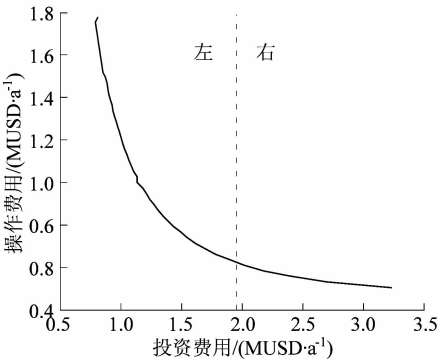


图4 夹点法操作费用与投资费用关系
Figure 4 Relationship between operating cost and capital cost by pinch method

分析图5可知,当传热焓损单价升高时,总焓损费用的最小点 $C_{\text{Ex,min}}$ 向着投资费用增大的方向移动。因传热焓损单价的提高会增加传热焓损费用在总费用中所占的权重,使传热焓损费用与流动焓损费用之间的

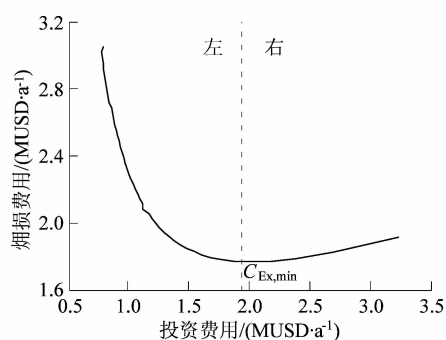


图5 换热网络总烟损费用与投资费用的关系

Figure 5 Relationship between exergy loss cost and capital cost by proposed method

平衡点向着有利于减小传热烟损费用的方向偏移,即最小传热温差 $\Delta T_{\min}$ 变小,流动烟损增加及投资费用增加的方向移动。当流动烟损单价升高时,与上述结果相反。

换热网络运行费用(操作和烟损费用)与投资费用之间的这种关系是基于热力学第一定律的夹点分析方法所无法揭示的,只有同时考虑流动烟损与传热烟损,才能更完整、全面地反映出换热网络中能量利用的情况。

4 结语

课题组研究了流动与传热烟损对换热网络设计方案的影响,并在换热网络的优化设计中考虑了碳排放因素,通过案例对提出的考虑碳排放的换热网络烟损经济学优化方法进行了探讨。案例分析结果表明:考虑碳排放因素后可明显降低换热网络二氧化碳排放量;换热网络的总烟损费用的极小值是由流动烟损费用与传热烟损费用之间的权衡决定的。笔者提出的方法为低能耗、低碳排放的换热网络设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 靳遵龙,董其伍,刘敏珊,等. 换热网络综合优化研究方法的进展[J]. 轻工机械,2006,24(3):149-152.
- [2] 李林,蒋宁,盛颂恩,等. 基于烟损耗的换热网络优化方法研究进展[J]. 轻工机械,2011,29(3):118-121.
- [3] DONG R, YU Y, ZHANG Z. Simultaneous optimization of integrated heat, mass and pressure exchange network using exergoeconomic method[J]. Applied energy, 2014, 136: 1098-1109.
- [4] 尹清华,华贵,吴国东,等. 同时考虑流动烟损费和传热强化的换热网络合成[J]. 化工学报, 1992, 43(1): 54-55.
- [5] LI Z H, HUA B. Modeling and optimizing for heat exchanger networks synthesis based on expert system and exergo-economic objective function[J]. Computers and chemical engineering, 2000, 24(2/3/4/5/6/7): 1225-1226.
- [6] ZHU X X, NIE X R. Pressure drop considerations for heat exchanger network grassroots design[J]. Computers and chemical engineering, 2002, 26(12): 1664-1665.
- [7] 刘霞. 煤制甲醇过程的低温余热利用与碳减排工艺研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 117-118.
- [8] JIN Z L, DONG Q W, LIU M S. Exergoeconomic analysis of heat exchanger networks for optimum minimum approach temperature[J]. Chemical engineering and technology, 2008, 31(2): 266-267.
- [9] POLLEY G T, PANJEHSHAHI M H, JEGEDE F O. Pressure drop considerations in the retrofit of heat exchanger networks[J]. Chemical engineering research and design, 1990, 68: 214-220.
- [10] AKBARI A, OMIDKHAH M R, HOJJATI M R. Heat exchanger network area targeting considering stream allocation to shell or tubes[J]. Computers and chemical engineering, 2008, 32(12): 3144-3146.
- [11] GADALLA M A, OLUJIC Z, JANSSENS P J, et al. Reducing CO₂ emissions and energy consumption of heat-integrated distillation systems[J]. Environmental science & technology, 2005, 39(17): 6861-6862.
- [12] AGHAHOSSEINI S, DINCER I. Exergy-based design and analysis of heat exchanger networks [M]//Progress in Clean Energy. Heidelberg: Springer International Publishing, 2015: 381-385.

[信息·简讯]

· 行业简讯 · 2018 第六届中国国际现代工业技术博览会在成都举办

2018 第六届成都工博会定于 2018 年 7 月 19 日-21 日在成都世纪城新国际会展中心隆重举行。展会设置机床工模具金属加工、工业自动化技术与装备、工业机器人、物流技术与运输系统、动力传动及微电子高端装备与制造共 5 个专区,实现了从基础工业到全自动化得提升,符合工业产业各类需求。

本届博览会规划总展出面积为 30 000 m²,展位数达 1 500 个,同期举办 2018(第六届)先进制造走进西部论坛、机器人高峰论坛、互联网+智能制造高峰论坛、中国通用航空产业发展高峰论坛、智慧城市高峰论坛、工业创新技术大赛等系列活动。在此背景下,为充分发挥成都工博会的平台作用,大力宣传和展示我国各地区工业的产业优势和整体实力,积极引导相关单位寻求国际、国内产业互补合作,共享博览会平台和商机,拓展市场,洽谈合作,促进共赢。

(孙旭)