

文章编号: 1005-3883(2000)02-0052-03

气-气热管换热器的优化选型设计

沈玉英¹, 陈保东¹, 方国文²

(1. 抚顺石油学院化工机械系, 辽宁抚顺 113001; 2. 辽河油田沈阳采油厂, 辽宁沈阳 110316)

摘 要: 热管是一种传热效率极高的新型传热元件, 由热管组成的热管换热器具有结构紧凑、有利于控制酸露点腐蚀、工作可靠等优点。这种换热器在热能利用、废热回收等方面应用广泛。热管换热器形式多样、结构复杂, 因而如何选择其形式是工程应用中的一个重要环节。以气-气热管换热器中的典型代表——热管空气预热器为例, 详细阐述了热管换热器整体优化设计及优化选型方法。以年净收益最大为目标函数, 建立了优化设计的数学模型, 并采用穷举法和复形调优法对热管换热器的热管基管直径、冷热流体侧翅片间距、翅片厚度、管束横向管间距及冷热流体的迎风流速进行优化。开发了热管换热器优化选型程序, 同时通过对实例进行计算和分析, 并与常规设计计算结果进行比较, 最后得出结论: 通过优化设计既可节省大量的初始投资, 又可降低运行成本, 从而获得可靠的经济效益, 为工程设计提供了设计思路。

关键词: 换热器; 优化; 计算机辅助设计**中图分类号:** TK172.4 **文献标识码:** A

世界上最早的一项热管专利是 1944 年由美国俄亥俄通用发动机公司的 Gaugler 以“传热器件”的名称提出的。1963 年 Grover 在他的专利中正式提出“热管”的命名, 并于 1964 年首次公开了他们的实验结果。1965 年 Cotter 首次较完整地阐述了热管理论。从此, 热管的应用从宇航扩大到了地面。

70 年代后期, 我国开始研制热管换热器。在 1972 年, 第一根钠热管运行成功, 以后相继研制成功氨、水、汞联苯等各种介质的热管, 并在应用上取得了一定的进展。

1 建立优化数学模型

1.1 目标函数的建立^[1,2]

热管换热器的综合经济成本受热管尺寸、翅片参数、介质流速、流动方式、流程数等诸

多因素的影响。对于气-气热管换热器而言, 介质的压力变化范围不大, 压力对投资的影响不大, 因此, 不予进行优化考虑。而热管的结构参数和运行状态参数对换热器的投资成本有很大的关系。故此, 提出以下目标函数:

$$Z_{\max} = f(d, S_T, S_{fh}, S_{fc}, \delta_{fh}, \delta_{fc}, u_{01}, u_{02}) \quad (1)$$

式中, d 为热管基管直径, m; S_T 为管束横向管间距, m; S_{fc} 、 S_{fh} 分别为冷热段翅片间距, m; δ_{fc} 、 δ_{fh} 分别为冷、热段翅片厚度, m; u_{01} 、 u_{02} 分别为冷、热流体迎风流速, m/s。其中, d 、 S_T 、 S_{fh} 、 S_{fc} 、 δ_{fh} 、 δ_{fc} 为离散型变量; u_{01} 、 u_{02} 为连续型变量。

为了便于计算, 将目标函数分为 3 部分: 年回收热量经济效益 z_1 、动力装置年运行费用 z_2 、其它费用 z_3 , 即有:

$$z = f = z_1 - z_2 - z_3 \quad (2)$$

年回收热量经济效益可表示为:

$$z_1 = (Q/Q_D) \tau_e C_1 \quad (3)$$

式中, Q 为换热器的换热量, W; Q_D 为燃料低

收稿日期: 1999-12-15

作者简介: 沈玉英(1972-), 女, 山东省鄄城县, 在读硕士研究生。

位发热值, kJ/kg; τ_e 为年有效运行时间, h/a;
 C_1 为燃料价格, 元/kg。

为了计算 z_1 需进行换热器的传热计算; 其传热计算的基本方程为建立在热力学第一定律基础上的热平衡方程, 热平衡方程为:

$$Q = Q_1 = Q_2 \quad (4)$$

$$Q_1 = \rho_{01} V_{01} c_{p1} (t_1' - t_1'') \quad (5)$$

$$Q_2 = \rho_{02} V_{02} c_{p2} (t_2'' - t_2') \quad (6)$$

式中, Q_1 、 Q_2 分别为热、冷流体的热流量, W;
 ρ_{01} 、 ρ_{02} 分别为热、冷流体的密度(在标准状况下), kg/m³; V_{01} 、 V_{02} 分别为热、冷流体的体积流量, m³/h; c_{p1} 、 c_{p2} 分别为热流体、冷流体的比定压热容, kJ/(kg·°C); t_1' 、 t_1'' 分别为热进、出口温度, °C; t_2' 、 t_2'' 分别为冷流体进、出口温度, °C。

动力装置运行费用可表示为:

$$z_2 = \sum P \tau_e C_2 \quad (7)$$

式中, P 为风机功率的增加量, W; C_2 为电费比价, 元/(kW·h);

$$P = \Delta p G / (3\,600 \, \eta_p \rho) \quad (8)$$

其中, Δp 为流动阻力增加量, Pa; G 为流体质量流量, kg/s; η_p 为风机效率; ρ 为定性温度下流体密度, kg/m³。

由此可见, z_2 主要取决于 Δp , 而 Δp 取决于 d 、 S_T 、 S_{fh} 、 S_{fc} 、 δ_{fh} 、 δ_{fc} 、 u_{01} 、 u_{02} 这 8 个设计变量, 计算 Δp 的试验公式有几种, 本文采用 Robinson K K 和 Briggs D E 的管外流动阻力公式^[2]来计算流动阻力损失。

其它费用主要包括年维修费用, 投资的年利息和年折旧费用。这 3 项与初投资费用有直接关系, 可表示为:

$$z_3 = (C_3 + C_4 + C_5) M \quad (9)$$

式中, C_3 为年维修费用与总投资之比; C_4 为贷款年利率; C_5 为年折旧率; M 为初始投资费用, 元/a。

为了计算 M , 需进行换热器的传热计算, 其传热方程为:

$$Q = KNF \Delta t_m = \Delta t_m N / \sum_{i=1}^8 R_i \quad (10)$$

式中, K 为换热器的总传热系数, W/(m²·°C); N 为热管支数; F 为换热器的传热面积, m²;

Δt_m 为换热器的对数平均温差, °C; $\sum_{i=1}^8 R_i$ 为换热器的总热阻, °C/W。由 8 项分热阻串联组成^[3], 分别是热管蒸发段的管外放热热阻 R_1 、污垢热阻 R_2 、管壁热阻 R_3 、内部蒸发热阻 R_4 、冷凝段的冷凝热阻 R_5 、管壁热阻 R_6 、污垢热阻 R_7 和管外放热热阻 R_8 , 这些热阻可由传热计算分别得到。

1. 2 约束条件^[1, 2]

热管换热器的优化设计既要满足整体尺寸要求, 同时也要考虑经济技术指标的要求。

① 热管换热器长 l 、宽 B 、高 H 的约束:

$$l_{\min} \leq l \leq l_{\max};$$

$$B_{\min} \leq B \leq B_{\max};$$

$$H_{\min} \leq H \leq H_{\max};$$

② 热流体最低压力 $\leq$ 热流体压力 $p_1 \leq$ 热流体最高压力; 冷流体最低压力 $\leq$ 冷流体压力 $p_2 \leq$ 冷流体最高压力;

③ 热流体侧末排管壁面温度 $t_b >$ 酸腐蚀许用温度 t_i ;

④ 热流体最小进口流速 $\leq$ 热流体进口流速 $u_1 \leq$ 热流体最大进口流速; 冷流体最小进口流速 $\leq$ 冷流体进口流速 $u_2 \leq$ 冷流体最大进口流速。

2 数学模型求解

通过编制计算机程序, 对离散型变量, 采用穷举择优方法; 对连续型变量采用复形调优法^[4]进行求解。具体的操作方法为: 先确定 d 、 S_T 、 S_{fh} 、 S_{fc} 、 δ_{fh} 、 δ_{fc} , 再利用已知的热工状态参数、经济校核参数和约束条件, 用复形调优法对 u_{01} 、 u_{02} 进行寻优, 得出一个设计方案, 变换离散变量值再寻优, 然后各个最优点相互比较, 得出目标函数的最优值。

3 计算结果分析

计算示例: 以 SZS10- 13- Y 蒸汽锅炉的热管空气预热器设计为例, 进行热管换热器的优化选型设计。已知参数如表 1 所示, 在这些

基础数据和计算的基础上, 根据所给约束条件, 在满足年净收益最大的原则下进行优化选型, 表 2 是优化选型设计与常规设计结果比较示例。

表 1 设计工艺参数

项 目	进口 温度/ ℃	出口 温度/ ℃	体积流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
热流体	250	160	8 512. 96
冷流体	20	未知	7 967. 56

表 2 优化设计与常规设计结果比较

比较项目	最低壁温/ ℃	总投资/ (万元)	年净收益/ (万元)
常规设计	109. 4	2 862	11. 359
优化设计	107. 9	2 614	11. 815

优化结果如图 1 所示, 其中优化方案是指在热管管径、管间距、翅片间距、翅片厚度排列组合的情况下, 用复形调优法对迎风流速进行优化的方案。图中共有 70 个点系列, 每个系列表示一种设计结果, 也就表示了 70 种型号。

优化后的各参数为:

热管基管直径 $d=38\text{ mm}$, 横向管间距 S_T

$=14\text{ mm}$, 翅片间距(烟) $S_{fh}=6\text{ mm}$, 翅片间距(空) $S_{fc}=6\text{ mm}$, 翅片厚度(烟) $\delta_{fh}=1.2\text{ mm}$, 翅片厚度(空) $\delta_{fc}=0.5\text{ mm}$, 迎风流速(烟) $u_{01}=2.15\text{ m/s}$, 迎风流速(空) $u_{02}=2.21\text{ m/s}$ 。

选择的热管换热器型式为:

热管尺寸: $\phi 0.038\text{ m} \times 0.002\text{ 5 m} \times 2.0\text{ m}$;

换热器尺寸: $2.105\text{ m} \times 1.049\text{ m} \times 2.252\text{ m}$ 。

从表 2 可看出, 优化设计的最低壁温、换热器总投资都比常规设计结果低。而年净收益比常规设计值高。最低壁温降低会使得热管热阻下降, 单管的换热量增加, 总管数减少, 使投资减少。优化后的年净收益指标(11.815 万元)比常规设计指标(11.359 万元)增加 0.456 万元, 提高 3.8%; 总投资(2.614 万元)比常规设计总投资(2.862 万元)节省 0.248 万元, 节约 9.5%。

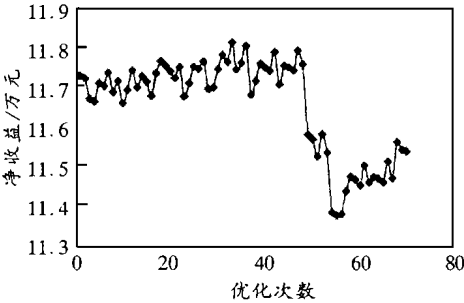


图 1 热管换热器优化选型净收益指标

参 考 文 献

[1] Ying Bing(杨冰). Practical optimum method used in computer program design(实用最优化方法及计算机程序)[M]. Ha Erbin(哈尔滨): Ha Erbin Craft Institute Press(哈尔滨船舶学院出版社), 1996. 1~ 30

[2] Wu Cunzhen(吴存真), Liu Guangduo(刘光铎). Heat pipe used in thermal energy engineering(热管在热能工程中应用)[M]. Beijing(北京): Hydrodynamic Force and Electric Power Press(水利电力出版社), 1992. 106~ 138

[3] Su Junlin(苏俊林), Li Xianliang(李显良), Hao Yufu(郝玉福). 热管式空气预热器的 优化设计[J]. Energy Research and Utilization(能源研究与利用), 1992, (3): 14~ 17

[4] Zhang Chengqi(章成器). Optimum design method used in engineering machinery(优化设计方法在工程机械中的应用)[M]. Shanghai(上海): Tongji College Press(同济大学出版社), 1991. 17~ 92

The Optimal Selection Design for Gas- Gas Heat Pipe Heat Exchanger

Shen Yuying¹, Cheng Baodong¹, Fang Guowen²

(1. Department of Mechanical Engineering, Fushun Petroleum Institute, Liaoning Fushun 113001, China;

2. Shenyang Oil Extraction Yard, Liaoning Oil Field, Liaoning Shenyang 110316, China)

(下转第 62 页)

Abstract: Fuzzy control has been proven to be effective in complex, time- varying and uncertain control systems. But there exist two main problems in the control of complex systems using fuzzy controller: determining and selecting fuzzy control rules and membership functions. Genetic algorithm is a probability - based search method that simulates the evolution process of living beings and adopts a natural evolution mechanism to represent complex phenomenon. Unsolvable problem by conventional method can be solved by genetic algorithms. In this paper, genetic algorithm has been used in fuzzy controller design, using this new method, fuzzy membership function can be optimized automatically according to known fuzzy control rules. The results of simulation for second- order system with time- delay show that this method can produce optimal or suboptimal parameters of membership function and give the fuzzy controller some good behaviors.

Key words: Genetic algorithms; Fuzzy control; Membership function

(Ed.: T, W)

(上接第 54 页)

Abstract: Heat pipe is a new type component with high heat transfer efficiency. The heat pipe heat exchanger composed of heat pipes has advantages of structure compact, easy to control the erosion of acid dew point and work - reliable, therefore was used widely in heat energy utilization and waste heat recalling. Heat pipe heat exchanger has many types, it is important how to choose them in engineering application. Exemplifying a the typical gas- gas heat pipe heat exchanger (heat- pipe air preheater), this paper discuss in detail methods of integrated optimal design and the optimal type selection for heat pipe heat exchangers. In order to optimize the heat pipe diameter, spacing of fin, pipeline spacing, thickness of fin, and windward velocity of flow, we take the maximal net investment income as object function and establish a mathematical model about the optimum design by adopting limit illustration method and plural adjusting optimum method. The computer program of the optimal selection for heat- pipe heat exchanger is developed. Computing and analyzing the application and comparing the optimization result with the conventional design result, show that this method may save much initial investment and obviously cut operating cost down. So we gain reliable economic benefit. The software also can be used as reference of engineering design and provide design philosophy for engineering design.

Key words: Heat exchanger; Optimization; Computer aided design

(Ed.: T, W)