

轻柴油汽提塔底 T 形翅片管重沸器 工艺设计与应用

张庆*, 王学生, 陈琴珠, 刘子龙

(华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘要:介绍了 T 形翅片管用于重沸器中强化沸腾传热的机理及其性能特点, 建立了 T 形翅片管重沸器设计计算模型。与 HTRI 计算光管重沸器相比, T 形翅片管管外沸腾传热系数提高了约 5 倍, 总传热系数提高了 80.4%, 重沸器面积裕量由原-26.58% 增加为 31.2%, 工业应用证明 T 形翅片管重沸器很好地满足了装置提负后的生产要求, 为 T 形翅片管重沸器工业设计提供了理论依据。

关键词: T 形翅片管; 重沸器; 计算模型; 沸腾传热强化; 换热器设计

中图分类号: TQ051.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)11-0162-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.11.037

Process design and application of T-shaped finned tube reboiler at light diesel stripping tower

ZHANG Qing*, WANG Xue-sheng, CHEN Qin-zhu, LIU Zi-long

(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The mechanism and performance characteristics of enhancing boiling heat transfer by using T-shaped finned tubes in reboiler are introduced. Besides, the design calculation model for T-shaped finned tube reboiler is established. Compared with HTRI calculations for plain tube reboiler, the outside tube boiling heat transfer coefficient of T-shaped finned tube reboiler increases by approximate 5 times, the total heat transfer coefficient increases by 80.4%, and the reboiler area margin increases from -26.58% to 31.2%. The industrial applications prove that the T-shaped finned tube reboiler meets well the production requirements of the expanded plant. This paper provides a theoretical basis for industrial design of T-shaped finned tube reboiler.

Key words: T-shaped finned tube; reboiler; calculation model; boiling heat transfer enhancement; exchanger design

重沸器是工业上实现沸腾传热的设备, 对塔底物流加热使部分物料返回塔内, 以提供塔器精馏过程需要的热源。一般要求将重沸器设计在泡核沸腾去操作, 而表面状况对于泡核沸腾传热系数有着很大的影响, 采用光管作为传热元件明显限制了重沸器的换热效果, 若用机械方式来进行传热元件表面粗糙化, 在初始使用时会因沸腾活化核点数的增加而提高泡核沸腾传热系数^[1], 但是这种活化点因其不稳定性会在长期使用后效果逐渐消失, 要保持长期稳定的高效沸腾传热, 必须将表面加工成固定的活化点, 目前工业常用 T 形翅片管与多孔金属表面管均属此类管型。

1978 年西德 Wieland Worke 公司率先开发使用了 T 形翅片管, 称为 Gewa-T 管, 加工工艺简便且可有效提高沸腾传热系数^[2]。研究表明, T 管的沸腾传热系数比光管提高 2~5 倍, 管外沸腾传热性能接近甚至超过机械加工表面多孔管 (Thermoexcel-

E)^[3]。Stephan 等^[4]、Xin 等^[5]与 Marto 等^[6]对 Gewa-T 管管外沸腾传热强化机理进行了研究, 而文献中对于沸腾传热理论计算模型介绍较少, 本文中将在其传热机理的介绍基础上, 重点研究 Gewa-T 管重沸器工艺计算与设计应用。

1 Gewa-T 管强化传热机理

将普通光滑管作为基管, 使用无切削的滚轧工艺轧制成 T 形翅片管, 由于坯管表层金属的塑性变形从而产生上方窄开口, 下方圆形凹槽的 T 形小槽穴, 而槽穴通道内复杂的气液两相流决定着其传热性能, 槽穴内物料的沸腾使得其气相有规律地从上方窄口溢出, 而 T 形翅片顶部不发生气化现象, 所以 T 形通道内壁面不会受下层管束气泡的冲刷, 使得管束间互不影响, 管束排布方式对沸腾传热影响基本可忽略。由于在 T 形通道处发生的液相连续渗入凹槽与气相连续冒出窄缝造成了高效的液膜蒸

发和大量出入通道的液体内循环,从而达到强化T形翅片管管外沸腾传热的作用。Gewa-T管传热示意图见图1。

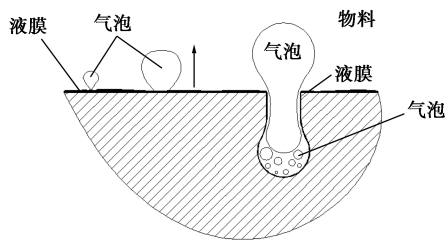


图1 Gewa-T管传热示意图

2 Gewa-T管性能特点

Gewa-T管主要特点为:①传热效率高,Gewa-T管对于工业酒精和轻质油品管外沸腾传热系数相较于光管能提高到2倍以上;同样对于R113工质管外沸腾传热系数则比光管高1.6~3.3倍^[7-8]。②沸腾所需传热温差小,研究表明,相同热流密度时,T形翅片管实现沸腾的传热温差仅为光管的1/5~1/2^[9]。③不易结垢,T形翅片管凭借T形翅片隧道内剧烈的气液交换和T缝出口气体高速喷出,保证了内部槽面和管外表面都不易结垢。

Gewa-T管凭借以上优势,能够很好达到强化传热和防垢的目的,是强化传热与防结垢技术结合起来的典型管型代表。

3 Gewa-T管重沸器工艺计算

对于T形翅片管重沸器设计计算可按图2流程进行,T形翅片管用于物料壳程沸腾,管内物料为无相变的显热传热或水蒸汽冷凝传热等操作工况,管内传热系数与压降计算和光管相同,本文中重点介绍管外沸腾传热与壳程压降的工艺计算模型,并给出工业设计计算实例。

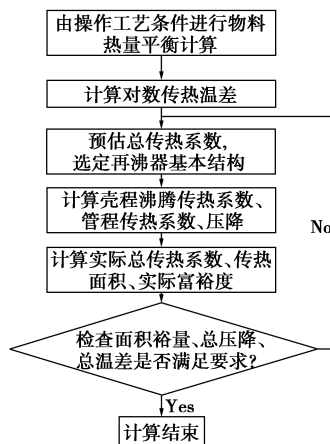


图2 Gewa-T管重沸器设计计算流程

(1) Gewa-T管内传热计算

管内单相对流换热,目前公认且广泛应用的管内单相流体换热系数计算为Dittus-Boelter公式^[1]:

(上接第161页)

4 总结

针对合成氨碳丙烯脱碳工艺流量大、压差小、流量波动大的特点,在国内首次将透平增压泵应用于碳丙烯脱碳能量回收装置中,整个系统调节控制简单,适应性强,系统运行平稳,综合回收效率高。应用透平增压泵后,显著降低系统故障发生率,停机检修时间缩短,带来良好的节能效果和可观的经济效益,对余压能量回收利用起到工程示范作用。

(1)对现有的气体净化系统改造,采用透平增压泵技术可极大地降低系统能耗、设备故障率,投资回收期短。采用透平增压泵加压减小扬程,不会增加电耗,真正达到节能的效果。

(2)对新建的气体净化设备直接配备透平增压式能量回收系统,一级供料泵流量不变扬程降低,选型更方便,成本更低,控制系统规格同样会降低。

参考文献

- [1] 马亮,薛树琦,闫文召.余压透平发电技术在合成氨工艺中应用研究[J].现代化工,2014,34(6):124-127.
- [2] 唐俊丽.合成氨工艺脱碳方法评述[J].化学工程师,2011,(12):34-36.
- [3] 章渊昶,牛月清,陈平,等.合成氨脱碳工艺和脱碳设备的技术改造[J].化工进展,2014,33(8):2224-2227.
- [4] 王照成,李繁荣,周明灿.余压能量回收装置在湿法脱碳工艺中的应用[J].化肥设计,2013,51(3):46-49.
- [5] 黄武星,孙彦发.能量回收液力透平泵在净化脱碳系统的应用[J].煤化工,2014,2(1):67-68.
- [6] 祝成耀,薛树琦,刘静.余压能量回收技术在柴油加氢精制工艺中的应用研究[J].现代化工,2015,35(7):124-127.
- [7] 张立胜,裴爱霞,术阿杰,等.特大型天然气净化装置液力透平能量回收技术优化[J].天然气工业,2012,32(7):74-76.
- [8] 肖涛.液力透平的选择与应用[J].科技视界,2015,(6):7-8.
- [9] 肖庆荣,郑远,叶萍.液压过滤器在在液压系统中常见故障及分析[J].液压与气动,2011,(12):116-117.
- [10] 汪龙.液压过滤器的选型设计与分析[J].过滤与分离,2016,26(2):17-20. ■

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^n \quad (1)$$

加热流体时 $n=0.4$, 冷却流体时 $n=0.3$ 。

对水平管内凝结换热, 采用 Akers 的水平管内凝结换热的试验式进行计算^[10]:

$$Re < 5 \times 10^4, d_i h_i / k_L = 5.03 (d_i G_e / \mu_L)^{1/3} (C_L \mu_L / k_L)^{1/3} \quad (2)$$

$$Re > 5 \times 10^4, d_i h_i / k_L = 0.0265 (d_i G_e / \mu_L)^{0.8} (C_L \mu_L / k_L)^{1/3} \quad (3)$$

式中, d_i 为换热管内径, m; μ_L 为管程液相介质黏度, $N \cdot s / m^2$; k_L 为管程液相介质导热系数, $W / (m \cdot ^\circ C)$; C_L 为管程液相介质比热, $J / (kg \cdot ^\circ C)$; h_i 为管程换热系数, $W / (m^2 \cdot ^\circ C)$; G_e 为当量质量流速, $kg / (m^2 \cdot s)$, 按下式计算:

$$G_e = G_L' + G_V' (\rho_L + \rho_V)^{0.5} \quad (4)$$

式中, G_L' 为单位管内截面积凝结液的质量流速, $kg / (m^2 \cdot s)$; G_V' 为单位管内截面积蒸汽的质量流速, $kg / (m^2 \cdot s)$; ρ_L 、 ρ_V 分别为管壳程液相与气相密度, kg / m^3 。

(2) Gewa-T 管外沸腾传热系数计算如下^[7]:

$$h_o = C \cdot \lambda_1 \cdot X_1^{2.096} \cdot X_2^{-0.7955} \cdot X_3^{0.8827} \cdot X_4^{-0.6439} \cdot Pr_1^{-0.1125} \quad (5)$$

$$X_1 = (\rho_V \cdot \mu_1) / (\rho_1 \cdot \mu_V) \quad (6)$$

$$X_2 = (q \cdot d_o) / (\mu_1 \cdot \Delta H_{IV}) \quad (7)$$

$$X_3 = \sigma / \rho_1 \quad (8)$$

$$X_4 = (\sigma \cdot \rho_V \cdot \Delta H_{IV}^2) / q^2 \quad (9)$$

式中, C 为与 T 形管结构有关的常数, 适用 30T018-2000 系列^[7], $C=1.47 \times 10^{12}$; λ_1 为壳程液相导热系数, $W / (m \cdot ^\circ C)$; Pr_1 为壳程液体普兰特数; X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 为重沸器参数; μ_1 、 μ_V 分别为壳程液相与气相动力黏度, $Pa \cdot s$; σ 为液相表面张力, N / m ; ΔH_{IV} 为壳程液相蒸发潜热, J / kg ; d_o 为基管外径, m; q 为以光管外表面为基准的平均热强度, W / m^2 。

(3) 传热总热阻

对于 Gewa-T 管重沸器, 以基管外表面为基准的传热总热阻表示如下:

$$1/K_o = (1/h_i)(d_o/d_i) + r_i(d_o/d_i) + (d_o/2\lambda_1) \ln(d_o/d_i) + r_o + 1/h_o \quad (10)$$

式中, λ_1 为管材导热系数, $W / (m \cdot ^\circ C)$; h_o 为管程液相介质导热系数, $W / (m \cdot ^\circ C)$; r_i 、 r_o 为管壳程污垢热阻, $m^2 \cdot K / W$ 。

(4) 重沸器壳程压降

$$\Delta P = [D_s \cdot (N_B + 1) \cdot f \cdot W_s^2] / [39.24 d_e \cdot \rho_1 \cdot \bar{\rho}_{IV}] \quad (11)$$

$$Re_o = (d_e \cdot W_s) / (S_o \cdot \mu_1) \quad (12)$$

式中, D_s 为重沸器壳体内径, m; N_B 为壳程折流板块数, 块; W_s 为壳程质量流量, kg / s ; d_e 为管子当量直径, m; $\bar{\rho}_{IV}$ 为蒸发段气液混合物的平均密度, kg / m^3 ; S_o 为壳程流通面积, $S_o = (D_s - N_L \cdot d_o) \cdot B$, m^2 ; B 为壳程弓形折流板间距, m; f_s 为壳程摩擦系数, 计算方法如下。

当壳程流体雷诺数满足以下条件:

$10 \leq Re_o < 100$ 时,

$$f = 98 \cdot Re_o^{-0.99} \quad (13)$$

$10 \leq Re_o < 1.5 \times 10^3$ 时,

$$f = 0.8466 \times [0.402 + 3.1/Re_o + (3.5102 \times 10^4)/Re_o^2 - (6.85 \times 10^6)/Re_o^3 + (4.157 \times 10^8)/Re_o^4] \quad (14)$$

$1.5 \times 10^3 \leq Re_o < 1.5 \times 10^4$ 时,

$$f = 0.6179 Re_o^{-0.0774} \quad (15)$$

$1.5 \times 10^4 \leq Re_o < 10^6$ 时,

$$f = 1.2704 Re_o^{-0.153} \quad (16)$$

4 Gewa-T 管重沸器设计应用实例

以某石化公司 80 万 t/a 蜡油加氢裂化装置提负改造项目为例, 提负后装置能力为 110 万 t/a。装置中轻柴油侧线汽提塔塔底重沸器负荷提升后工艺条件如表 1。

表 1 操作工艺条件

项目	管程中压蒸汽	壳程轻柴油
入口温度/ $^\circ C$	340	238.78
出口温度/ $^\circ C$	244.33	241.19
入口压力/MPa	3.500	0.130
流量/ $(kg \cdot h^{-1})$	3522.024	93578.4
气相分数(进/出)	1/0	0/0.293
污垢热阻/ $(m^2 \cdot K \cdot W^{-1})$	0.00035	0.00034

给出管程中压蒸汽与壳程轻柴油物性如表 2。

表 2 介质物性

物性	中压蒸汽		轻柴油	
	进口	出口	进口	出口
温度/ $^\circ C$	340.00	244.33	238.78	241.19
压力/kPa	3601.37	3601.12	231.328	226.896
气态比重	1.00	0.00	2.305×10^{-4}	0.2930
气态物性				
密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	13.7102	17.9084	9.5339	9.6087
黏度/ $(mN \cdot s \cdot m^{-1})$	0.0220	0.0181	0.0091	0.0091
导热系数/ $(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	0.0479	0.0376	0.0283	0.0284
比热/ $(kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	2.3412	2.7259	2.4090	2.4188

续表

物性	中压蒸汽		轻柴油	
	进口	出口	进口	出口
液态物性				
密度/(kg·m ⁻³)	807.458	807.458	605.598	629.395
黏度/(mN·s·m ⁻¹)	0.1095	0.1095	0.1744	0.1738
导热系数/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	0.6249	0.6249	0.0755	0.0750
比热/(kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	4.9756	4.9756	2.8706	2.8795
潜热/(kJ·kg ⁻¹)	1783.60	1783.60	237.165	236.028
表面张力/(mN·m ⁻¹)	27.2259	27.2259	9.0601	8.9919

首先采用 HTRI 换热器设计软件对原光管换热器校核结果如表 3。

表 3 重沸器主要参数

换热器形式	BJ12U
壳程/管程	1/4
壳体内径/mm	1400
换热管(内/外径)/mm	14/19
换热管中心距/mm	25
换热管长度/mm	5000
折流板数/间距/(块·mm)	9/400
换热管根数/根	1188U
折流板缺口/%	25.4
壳程传热系数/(W·m ⁻² ·°C ⁻¹)	756.25
管程传热系数/(W·m ⁻² ·°C ⁻¹)	6435.31
面积裕量/%	-26.58

上述校核光管重沸器面积裕量为-26.58%,可见原重沸器已无法满足提负后的操作要求,因此对其进行传热强化改造十分必要。

采用上述原再沸器壳体结构不变,但管束采用 Gewa-T 管, Gewa-T 管翅片结构如图 3 所示。

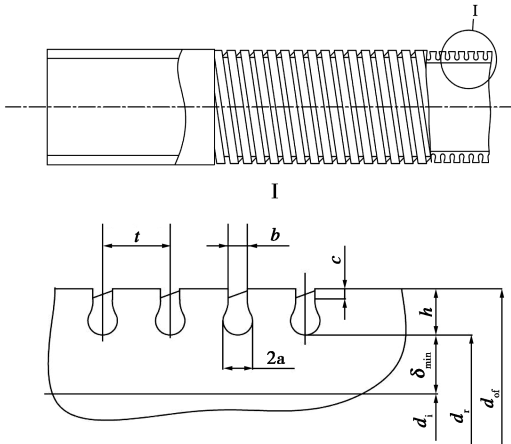


图 3 Gewa-T 管结构简图

常用 Gewa-T 管管型如表 4。

表 4 T 形翅片管尺寸表

管子规格 d×δ	19×2.0	25×2.5
翅片外径 d _{of}	18.2	24.2
管子内径 d _i	13.0	18.0
翅片根部直径 d _r	16.0	22.0
翅片间距 t	1.6	1.6
隧道宽度 2a	0.5	0.7
平均开口度 b	0.2~0.4	0.2~0.4
翅片高度 h	0.9~1.2	0.9~1.2
管子最小厚度 δ	1.5	2.0
光管部分长度 l*	130	130

注: * 为 T 形翅片管光端部分的长度。

HTRI 换热器设计软件无 T 型管束再沸器计算模块,这里对采用 19×2.0 规格 T 型管束再沸器工艺手工计算如下。

(1) Gewa-T 管重沸器管程换热系数计算

管内中压蒸汽完全冷凝换热系数计算如下:

$$G_L' = (3\ 522.024/3\ 600)/(594 \times 3.14/4 \times 0.013^2) = 12.415 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \quad (17)$$

$$G_V' = (3\ 522.024/3\ 600)/(594 \times 3.14/4 \times 0.013^2) = 12.415 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \quad (18)$$

则当量质量流速:

$$G_e = G_L' + G_V'(\rho_L + \rho_V)^{0.5} = 368.180 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \quad (19)$$

这里,管内介质雷诺数:

$$Re = d_i G_e / \mu_L = 4.371 \times 10^4 < 5 \times 10^4 \quad (20)$$

采用式(2)计算管内凝结换热系数,则 Gewa-T 水平管束管内冷凝换热系数:

$$h_i = 5.03(d_i G_e / \mu_L)^{1/3} (C_1 \mu_L / k_L)^{1/3} (k_L / d_i) = 8\ 136.694 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (21)$$

(2) Gewa-T 管重沸器壳程换热系数计算

由式(5)~式(9),代入介质物性计算可得:

$$h_o = C \cdot \lambda_1 \cdot X_1^{2.096} \cdot X_2^{-0.7955} \cdot X_3^{0.8827} \cdot X_4^{-0.6439} \cdot Pr_1^{-0.1125} = 4\ 536.885 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (22)$$

(3) Gewa-T 管重沸器总换热系数计算

根据操作工艺条件:管程与壳程污垢热阻分别取 0.000 35、0.000 34 m²·K/W。则以光管外表面为基准的总传热系数计算如下:

$$K_o = 1/[(1/h_i)(d_o/d_i) + r_i(d_o/d_i) + (d_o/2\lambda_1)\ln(d_o/d_i) + r_o + 1/h_o] = 748.827 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (23)$$

故轻柴油侧线汽提塔底重沸器总传热系数为 748.827 W/(m²·K)。

(4) Gewa-T 管重沸器面积裕量

重沸器热负荷:

$$Q = m(H_1 - H_2) = (3\ 522.04/3\ 600) \times (3\ 085.38 - 1\ 065.437) = 1\ 976.2 \text{ kW} \quad (24)$$

式中, m 为管程介质流量, kg/h ; H_1 、 H_2 分别为管程进出口介质焓值, kJ/kg 。

则重沸器总传热系数:

$$K_{\text{Transfer, Service}} = Q/S\Delta t = (1\,976.2 \times 10^3) / (736.72 \times 4.7) = 570.730 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (25)$$

重沸器面积余量为:

$$\delta = [(K_o - K_{\text{Transfer, Service}}) / K_{\text{Transfer, Service}}] \times 100\% = 31.2\% \quad (26)$$

(5) Gewa-T 管重沸器壳程压降

Gewa-T 管重沸器壳程流通面积与流体雷诺数计算如下:

$$S_o = (D_s - N_l \cdot d_o) \times B = 0.37 \text{ m}^2 \quad (27)$$

式中, N_l 为中心排管数, 根据管束排列方式取 25。

$$Re_o = (d_o \cdot W_s) / (S_o \cdot \mu_1) = 7\,653.825 \quad (28)$$

代入式(15):

$$f = 0.6179 Re_o^{-0.0774} = 0.309 \quad (29)$$

$$\bar{\rho}_{IV} = 1/[R_V/\rho_V + (1 - R_V)/\rho_1] = 29.97 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad (30)$$

式中, R_V 为出口气化率。

$$\Delta P = [D_s \cdot (N_B + 1) \cdot f \cdot W_s^2] / [39.24 d_e \cdot \rho_1 \cdot \bar{\rho}_{IV}] = 2.08 \text{ kPa} \quad (31)$$

采用光管与 Gewa-T 管的重沸器性能如表 5。

表 5 换热流动参数对比

参数	光管	Gewa-T 管
管子规格/mm	$\phi 19 \times 2.5$	$\phi 19 \times 2$
管程换热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1})$	6435.31	8136.694
壳程换热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1})$	756.25	4536.885
总传热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1})$	415.07	748.827
面积裕量/%	-26.58	31.2
壳程压降/kPa	1.91	2.08

由表 5 可知, 相较于光管, Gewa-T 管显著提高了管外沸腾传热系数, 同时轧制后管子内径略微变小, 管内换热系数也得到提高, 重沸器设计面积裕量明显提高, 为增效提负后的重沸器提供了较大的弹性操作空间, 能更好满足重沸器运行要求, 同时壳程压力降与光管相比略微增加, 在可接受范围内。所采用的 T 形翅片管实物如图 4。

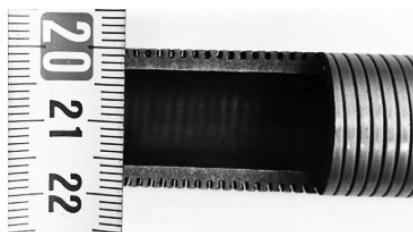


图 4 T 形翅片管实物

上述设计 T 形翅片管再沸器自 2014 年 12 月于

某石化投产开车使用以来, 设备至今运行稳定, 很好地满足了原油加工提负改造要求。新设备传热效率高, 节能效果好, 所产生的经济效益明显。

5 结论

(1) 以轻柴油作为重沸器管外换热介质, 使用 Gewa-T 管管外沸腾传热模型计算表明, Gewa-T 管管外沸腾传热系数比光管提高了约 5 倍, 显著改善了重沸器管外传热情况。

(2) Gewa-T 管轧制后内径略微变小, 管内换热系数也得到提高, 使用 Akers 的水平管内凝结换热计算关联式手算 Gewa-T 管内换热系数结果比 HTRI 换热器软件计算光管管内换热系数稍高, 表明使用 Akers 的水平管内凝结换热计算关联式进行换热器设计的可靠性。

(3) 给出以 Gewa-T 管作为传热元件重沸器设计计算模型, 使用该模型设计计算具体重沸器案例, 与提负前使用光管重沸器相比, 重沸器面积裕量显著增加, 能适应提负后更大的弹性操作空间, 重沸器投产运行效果良好, 验证了该计算模型的合理性。

参考文献

- [1] 施林德尔. 换热器设计手册[M]. 北京, 机械工业出版社, 1989.
- [2] Yilmaz S, Hwalek J J, Westwater J W. Pool boiling heat transfer performance for commercial enhanced tube surfaces, ASME paper 80-HT-41[C]//Proc. ASME/AIChE National Heat Transfer Conf, Orlando, Florida, 1980; 27-30.
- [3] Marto P J, Lepere V J. Pool boiling heat transfer from enhanced surfaces to dielectric fluids[J]. Journal of Heat Transfer, 1982, 104(2): 292-299.
- [4] Stephan K, Mitrovic J. Heat transfer in natural convective boiling of refrigerants and refrigerant-oil mixtures in bundles of T-shaped finned tubes[J]. American Society of Mechanical Engineers, 1981; 131-146.
- [5] Xin M D A O, Chao Y I D. Analysis and experiment of boiling heat transfer on T-shaped finned surfaces[J]. Chemical Engineering Communications, 1987, 50(1/2/3/4/5/6): 185-199.
- [6] Marto P J, Hernandez B. Nucleate pool-boiling characteristics of GEWA-T surface in R-113[C]//AIChE Symp Ser, 1983, (79): 1-10.
- [7] 刘巍, 邓方义. 冷换设备工艺计算手册[M]. 北京, 中国石化出版社, 2003.
- [8] Ayub Z H, Bergles A E. Pool boiling from GEWA surfaces in water and R-113[J]. Heat and Mass Transfer, 1987, 21(4): 209-219.
- [9] 郭宏新, 刘巍, 梁龙虎. T 形翅片管卧式重沸器和蒸汽发生器性能研究及应用[J]. 化学工程, 2004, 32(1): 13-16.
- [10] Akers W W, Deans H A, Crosser O K. Condensing heat transfer within horizontal tubes[J]. Chem. Eng. Progr., 1958, 54. ■