

# 螺旋回热器的传热、经济性能 及其制造\*

王艳民

(化工系)

**摘 要:** 本文在较大的迪恩准数范围内用壁温法研究了螺旋回热器的传热性能,得到了其传热性能关系式,并分析了螺旋回热器的制造方法及其经济性能。结果表明螺旋回热器的传热性能及其经济性能良好。

**关键词:** 螺旋回热器, 传热, 经济性, 制造

目前,人们对换热器传热性能的研究工作集中在两方面:一方面是对现有换热器的传热元件进行强化传热的研究;另一方面是开发新型换热器并研究其流体力学特性及其传热性能。本文所研究的螺旋回热器属于新型换热器的一种。和螺旋板换热器相比,螺旋回热器的流道曲率半径是一定的,其流动截面形状与一个长宽比不很大的矩形近似,而螺旋板换热器的流道曲率半径是变化的,其流动截面是一个长宽比相当大的矩形。从某种意义上说,螺旋回热器更象蛇管换热器。但它们也是有区别的:螺旋回热器的流道截面是一个由两个圆柱面和两个螺旋面所围成的一个不规则形状,其曲率和螺旋升角都比蛇管的大。由于这些原因,使得螺旋回热器的流道截面参数的计算相当复杂,不宜用近似方法求解(否则会造成较大的误差),只有用数值方法才可得到其精确值。

对于该回热器的研究工作,前人已做过部分工作<sup>(1) (2)</sup>,但他们的实验模型的螺旋升角都较大。一般说来,螺旋升角越大,其传热性能就越差,当螺旋升角等于九十度时,螺旋回热器就变成一直管了,这时其传热性能最差。本文用壁温法对小螺旋升角的回热器的传热性能进行了实验研究,并对其制造方法和经济性能进行了分析、讨论。

## 1 二次流场强化传热

流体在螺旋回热器中流动时,其流场不仅受到惯性力和粘滞力的作用,而且还受到离心力的影响。根据普兰特边界层理论,在螺旋回热器的流动截面上,必然形成一个越是靠近壁面其流速越低,而流动截面中心流速较高的主流速度场。由于流动截面上主流速度分

---

\* 收稿日期: 1989.02.28

布不均匀以及流动截面上各点的曲率半径不等,因而产生了不均匀的离心力场,其离心力为:

$$F = m \frac{v^2}{r} \quad (1)$$

式中:  $m$ 、 $v$ 、 $r$  分别为流体质点的质量、流速以及和其所在位置相对应的曲率半径。

由式(1)可知,在流道的外侧部分,其曲率半径大,主流速比中心的流速小,因而其所受的离心力也小,在流道的内侧部分,其流速小,但该部分的曲率半径比其它地方都小,因此其离心力比外侧大。在流道的中心,其曲率半径比内侧大比外侧小,但中心的流速最大。曲率半径和主流速度总的影晌结果是流道中心的流体所受到的离心力最大并向外抛出,留下的空间只有靠沿壁面向内流动的流体来补充,结果就形成了如图1所示的二次流场。二次流场的产生,增加了流体湍动,使边界层厚度减薄,因而可大大加强壁面附近的动量传递和热量传递,使螺旋回热器的传热速率大大提高。

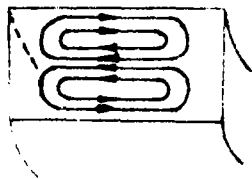


图1 二次流场示意图

## 2 传热实验

本文通过因次分析得到了螺旋回热器的传热性能的准数关系式。当回热器的几何参数不变时,其准数关系式为:

$$N_u = C D_n^m P_r^n \quad (2)$$

式中  $D_n$  代表了惯性力、粘性力和离心力对传热性能的影响。由文献[1]、[2]可知,螺旋回热器中  $N_u$  与  $P_r$  的相关指数  $n$  与直管相差不大。本文中流体被冷却时,取  $n=0.29$ ,流体被加热时,取  $n=0.39$ 。

本文实验模型是由青铜棒车制而成的。其主要结构参数如下:

螺距  $h=18.00\text{mm}$ ;

流道中心线直径  $D=43.74\text{mm}$ ;

流道当量直径  $d_e=8.53\text{mm}$ ;

螺旋升角  $\varphi=7.46^\circ$ ;

传热面积  $F=0.04077\text{m}^2$ ;

流道横截面积  $A=88.30\text{mm}^2$ ;

流道宽度  $b=6.06\text{mm}$ ;

螺旋面厚度  $\delta=2.94\text{mm}$ ;

实验段流道长度  $l=1386\text{mm}$ ;

在上述参数中,流道当量直径、流道横截面积等是根据文献[3]由数值计算得到的。

实验流程如图 2 所示。在实验过程中,螺旋回热器垂直放置(因为回热器水平放置时,其流道上部有大量气泡不易排除并使实验数据产生较大误差)。测量数据有流量、流体温度和壁温。在本实验中,流体流量是用经过校核的孔板流量计测量的,流体温度用  $\phi 1$  铜-康铜热电偶测量,壁面温度用  $\phi 0.2$  铜-康铜热电偶测量。所有热电偶均用刻度为  $0.05^\circ\text{C}$  的标准水银柱温度计标定。热电势由 0.05 级精度的 UJ-31 型低电势直流电位差计测定。螺旋回热器用晴纶棉良好保温。

在实验操作中,冷介质用自来水,热介质用蒸馏水。经两级恒温槽加热恒温后,热介质温度波动不大于  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。每调整一个工况,待系统完全稳定后便开始测取数据。在每一工况下,每一待测量重复测量三次,取其算术平均值作为该工况下的测量数据,用三次测量值的残差计算标准方差。

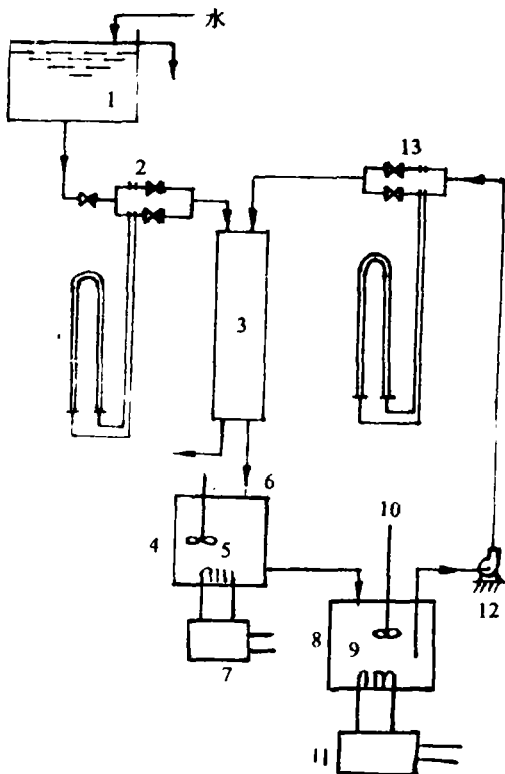


图 2 实验流程图

1. 高位水槽; 2.13. 孔板流量计; 3. 回热器;  
4. 一级恒温槽; 5.9. 电加热器; 6.10. 搅拌机;  
7.11. 继电器; 8. 二级恒温槽; 12. 热水泵;

### 3 实验数据处理及 实验结果

考虑到自来水的性质不稳定,我们取热介质的测量数据作为计算回热器传热性能的依据。对于实验数据,本文作者进行了数据处理,并得到以下结果:

$$N_u = 0.138 D_n^{0.804} P_r^n \quad D_n = 2760 \sim 25700 \quad (3)$$

$$\text{或: } N_u = 0.0715 R_e^{0.804} P_r^n \quad R_e = 6300 \sim 58000 \quad (4)$$

回归分析得到的方程的相关系数等于 1,实验值与予报值最大偏差 8.5%,平均偏差 6.4%,实验点标准方差为 3.0%。把努塞尔特准数和普兰特准数的 0.29 次方之比与迪恩准数在双对数坐标上进行标绘,如图 3 所示。

从实验结果可以看出,在螺旋回热器中,努塞尔特准数与雷诺准数的相关指数与直管的十分接近。与文献[1]、[2]所得结果比较,本文所得的努塞尔特准数与雷诺准数的相关指数与文献[1]的结果相当吻合而大于文献[2]的实验结果。

文献[1]、[2]的实验结果与本文实验结果的比较见图 4。从图 4 中可以看出,本螺旋回热器的对流传热膜系数大于文献[1]所得的传热膜系数,同样也大于文献[2]所得结果。在本文实验范围内,所得努塞尔特准数为文献[2]的 0.97 到 1.8 倍,为文献[1]的 1.45 到 1.51

倍。因此可以说明本实验模型的传热性能较好, 文献[2]的实验模型次之, 文献[1]的实验模型则较差。其原因主要是因为本文实验模型的螺旋升角最小, 文献[1]的实验模型螺旋升角最大, 而文献[2]的实验模型螺旋升角居中的缘故。因而可以认为, 螺旋升角等几何参数对回热器的传热性能有影响, 并且螺旋升角较小对热量传递是有益的。

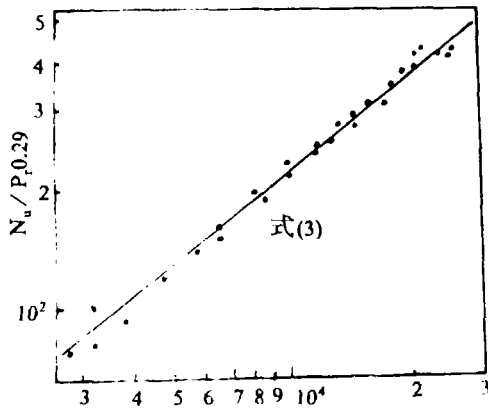
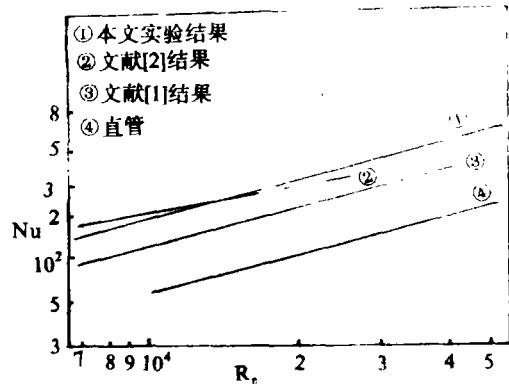
图3  $Nu/P_r^{0.29}$  与  $D_o$  标绘图

图4 文献[1]、[2]与本方实验结果比较

和直管相比, 螺旋回热器的传热性能大为提高 (见图4)。将本文所得的公式(4)与直管的传热关系  $Nu_{us} = 0.023 R_c^{0.8} P_r^{n_1}$  (冷却、加热时  $n_1$  分别取 0.3 和 0.4) 相比得到:

$$Nu_u / Nu_{us} = 3.11 R_c^{0.004} P_r^{-0.01} \quad (5)$$

在本文实验范围内, 由式(5)计算可知, 螺旋回热器的对流放热系数为直管的 4.16 到 4.55 倍。

#### 4 螺旋回热器的制造方法

目前, 螺旋回热器的制造方法有四种: 车削、粘接、焊接和高频焊接法。

车削就是把圆钢作坯料, 在车床上加工到所要求的尺寸, 这样便制成了回热器内件, 然后把铁皮缠绕在内件上形成外壳, 并加以焊接以防漏防窜, 最后焊接封头、接管。这样就制成了螺旋回热器。这种制造方法材料消耗量大, 内外半径比大, 外径尺寸小, 传热面较厚。但是该方法制造速度快, 几何尺寸精确, 一般可作实验模型用。若用耐蚀材料制造, 也可用于食品加工等。

粘接方法是 Terra Tek, Inc. 和 Millcreek 玻璃公司采用的制造方法。该方法是先加工出内件模型段, 每个模型段构成螺旋流道的  $1/3$  圈, 每两个模型段之间的连接处用硅酸铝陶瓷纤维纸密封。他们所用材料有不锈钢、碳化硅两种。其不锈钢金属设备用于中温 ( $430^\circ\text{C}$  以下) 进行传热和流体力学实验, 碳化硅陶瓷设备用于高温 (高达  $1200^\circ\text{C}$ ) 实验以估计在高温下辐射传热的影响。他们所制造的设备直径有 8 英寸 (203mm), 15 英寸 (381mm), 最大直径可达 30 英寸 (762mm)。

焊接法是把金属板材剪成半圆环形,并在模具上挤压成螺旋面,并焊接在心棒上。两段相邻螺旋面也通过焊接连接起来,每段螺旋面形成螺旋面的半个螺距。内件做成后再包焊外壳就制成了螺旋回热器,该法制造简单,成本低,内外半径比小,传热面厚度可以很薄,并且还可以把螺旋面挤压上波纹,以强化传热。但是该法制造周期长些,并且由于材料限制,一般只用于中低温热交换。尽管如此,作为回收工业废热的换热器,该法仍不失为一种有效的制造方法。

高频焊接法是先利用绕片机把钢带绕在心棒上(也可绕在钢管上),然后进行高频焊接把钢带焊在心棒上就制成了回热器内件。该方法生产效率高,工人劳动强度低,适宜于大批量生产,但该方法对加工设备要求较高,需要有绕片机等专用设备,一次投资较大,并且由于受到绕片机工作性能的影响,所制成的回热器的流道的内外半径比较大。亦即翅片内外半径比较大。目前国内在直径为 25mm 的心棒上绕制铝带,其翅片外径最大为 57mm。

## 5 螺旋回热器的经济性能

对于螺旋回热器的经济性能,Terra Tek, Inc.和 Millcreek 玻璃公司做了一些工作。他们基于螺旋回热器的流体力学和传热特性以及设备的初投资,用电子计算机对螺旋回热器的经济性能进行了分析。由于螺旋回热器当时还处于研究开发阶段,没有实际操作经验,因而其经济性能分析中的许多因素都是假定的,不适用其它材料制造的和其它方法制造的回热器。他们的分析结果如下表:

表 1 螺旋回热器偿付期(年)

炉 型	8 英寸模型		15 英寸模型		30 英寸模型	
预热温度 $^{\circ}\text{C}$	538	927	538	927	538	927
25 (吨/日处理)	1.5	11.4	4.2	12.9	3.8	—
150 (吨/日处理)	4.8	15.9	3.9	11.8	3.2	11.4
300 (吨/日处理)	4.6	13.8	4.0	10.7	3.1	12.0
600 (吨/日处理)	4.8	15.1	4.0	12.4	3.0	11.8

从表可以看出,偿付期与炉型尺寸、预热温度有关,大直径螺旋回热器的经济性能较小直径的好,用于低的预热温度比高的预热温度经济,且预热温度很高时(如  $927^{\circ}\text{C}$  以上),使用螺旋回热器是很不经济的。

由于影响螺旋回热器经济性能的因素很多,如材料、使用条件(温度、压力、流量等)、制造方法、结构参数等,条件不同,其经济性就会有所差异。因而一般不能把对某回热器的经济性能分析结果用于其它的回热器。因此本文根据螺旋回热器传热性能的提高(与直管相比)和流体阻力的增加(与直管相比)来评价其经济性能。定义  $M$  为经济性能评价因子:

$$M = \frac{(N_u / N_{uo})}{(\Gamma / \Gamma_0)} \quad (6)$$

式中分子代表该回热器代替列管换热器所获得的热收益,分母表示获得该收益所付出的动力费, $\Gamma$ 为摩擦系数。只要  $M > 1$ ,我们就有理由认为该回热器的经济性能优于列管式换热器,并且  $M$  越大越好。

根据文献[4]和本文结果,得到:

$$M = 3.94 \times 10^{-3} R_c^{0.620} P_r^{-0.01} \quad R_c = 6300 \sim 10200 \quad (7)$$

$$M = 0.232 R_c^{0.181} P_r^{-0.01} \quad R_c = 11800 \sim 36000 \quad (8)$$

$M$  与  $R_c$  的关系如图 5 所示。从图可以看出,当  $R_c > 7735$  后,  $M$  均大于 1。在公式适用范围内,  $M$  的最大值为 1.53。因此,螺旋回热器具有较好的经济性能,在高雷诺数下操作,其经济性更佳。

## 6 结 论

1、本文对螺旋回热器具有较好的传热性能的原因进行分析。在较大的迪恩准数范围内用壁温法得到了其对流传热性能关系式。

2、螺旋升角较小时,其传热性能较好。建议在设计螺旋回热器时采用小的螺旋升角。

3、回热器的传热性能大大优于直管。在本文实验范围内,回热器的对流传热努塞尔特准数为直管的 4.16 到 4.55 倍。

4、本文讨论分析了螺旋回热器的制造方法,对于使用中低温的回热器,焊接法是一种经济可行的方法。

5、本文对螺旋回热器的经济性能进行了讨论和分析,并引入了经济性能评价因子对回热器的经济性能进行了评价,结果表明,回热器具有较好的经济性。设计时,应注意使回热器在较大的雷诺准数下工作,以利于提高经济效益。

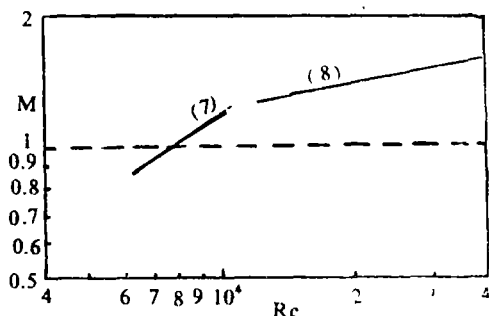


图 5  $M$  与  $R_c$  的变化关系图

## 参 考 文 献

- (1) Terra, Inc., High temperature range recuperator phase II final report prototype and material and analytical studies. DQE/CE/40012-2(A23)
- (2) Liu MingKang et al. A study on convective heat transfer in helical recuperator. Presented at the winter annual meeting of ASME, Miami Beach, Floride—November 17–21, 1985,

85-WA/HT-51

(3) 古大田, 刘明刚. 螺旋形流道当量直径的计算. 石油化工设备. 1986, 15(7): 21

(4) 王艳民. 螺旋回热器的流体阻力研究. 郑州工学院学报. 1987, 8(4)

(5) 王补宣. 工程传热传质学. 科学出版社, 1986

## The Forced Convective Heat Transfer, Economic Evaluation and Manufacturing Method of A Helical Recuperator

Wang Yanmin

(ZhengZhou Institute of Technology)

**Abstract:** The paper deals with the forced convective heat transfer of a helical recuperator for the steady flow of fluid. Based on the experiments, the relations between the Nusselt number  $Nu$ , and Reynolds number  $Re$  are obtained by wall-temperature method, and it is analysed that the economy and the manufacturing method of a helical recuperator. The results show the heat transfer property and the economy of a helical recuperator are very good.

**Keywords:** helical recuperator, heat transfer, economy, manufacture