

螺旋回热器的流体阻力研究

王艳民

(化工系)

提 要

本文在相似理论指导下,用水作介质对螺旋回热器的流体阻力进行了实验研究,并在较大的迪恩准数范围内,获得了螺旋回热器的摩擦系数与迪恩准数的经验方程式。所得结果对于计算螺旋回热器中的流体阻力,全面评价螺旋回热器的经济性能等都具有重大意义。

关键词: 螺旋回热器, 流体阻力, 压降

符号说明:

b: 流道截面宽度

de: 水力当量直径

D: 螺旋流道中心线直径

D_n : 迪恩准数, $D_n = Re \cdot \sqrt{de}/D$

E: 误差向量

Re: 雷诺准数

ϵ : 绝对粗糙度

μ : 流体粘度

ρ : 流体比重

φ : 螺旋升角

f: 摩擦系数 $f = -\frac{1}{2} \frac{\Delta p}{\rho v^2} \cdot \frac{de}{l}$

l: 实验段流道长度

f_s : 直管摩擦系数

$-\Delta p$: 压力降

h : 螺距

R: 相关系数

螺旋回热器作为一种高效换热设备,但人们对其传热性能的研究工作进行得不多[1,2],而对其流体阻力的研究工作则做得更少。根据作者查阅到的唯一的研究过螺旋回热器的流体阻力的文献[1]介绍,Millcreek玻璃公司用空气作介质,在 $Re = 800 \sim 30,000$ 的范围内,对螺旋回热器的流体阻力进行了实验研究,得到了摩擦系数与雷诺准数的数学关系式。而用水作介质,研究螺旋回热器的流体阻力的文章尚未见有。

前人对于与螺旋回热器结构相似的矩形螺旋管的研究工作,大部分局限于雷诺准数较低的层流流动区。文献[4]在 $D_n = 5 \sim 650$ 的低层流区范围内,对矩形螺旋管内的流场进行了数值求解,获得了摩擦系数的数学关系式。文献[5, 6, 7]等也在层流状态下,对矩形螺旋管内的流场进行了数值解。但是,需要指出的是,螺旋回热器与矩形螺旋管相比,具有如下主要区别:第一,螺旋回热器的流道曲率和螺旋升角都比较大,而人们通常研究的矩形螺旋管的情况则恰恰相反。第二,螺旋回热器的流道截面形状比较复杂。

鉴于此,本文作者用水作实验介质,通过实验研究了螺旋回热器的流体阻力与迪恩准数的变化关系。该项研究工作对于螺旋回热器的工艺计算,指导其设计以及工业应用等都是很有

本文1987年6月5日收到

意义的。

一、理论分析及实验工作

在螺旋回热器中,影响压力降 $-\Delta p$ 的因素主要有流道当量直径 d_e ,流速 u ,流道长 b ,介质密度 ρ ,介质粘度 μ ,流道内表面的粗糙度 ε ,螺距 h ,流道中心线直径 D 及流道截面宽 b 等等,故有:

$$-\Delta p = f(d_e, u, l, \rho, \mu, \varepsilon, h, D, b) \quad (1)$$

根据 π 定理,可假设其函数形式为:

$$-\Delta p = c_1 d_e^{a_1} u^{a_2} \rho^{a_3} \mu^{a_4} \varepsilon^{a_5} h^{a_6} D^{a_7} b^{a_8} \quad (2)$$

通过因次分析最后可得:

$$-\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho u^2} \frac{d_e}{l} = c_1 \left(\frac{d_e u \rho}{\mu} \right)^{b_1} \left(\frac{d_e}{D} \right)^{b_2} \left(\frac{h}{D} \right)^{b_3} \left(\frac{d_e}{d_e} \right)^{b_4} \left(\frac{1}{d_e} \right)^{b_5} \left(\frac{\varepsilon}{d_e} \right)^{b_6} \quad (3)$$

式中, $f = -\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho u^2} \frac{d_e}{l}$ 摩擦系数

$Re = \frac{d_e u \rho}{\mu}$ 雷诺准数

d_e/D 曲率比

h/D 螺旋升角, $\varphi = \tan^{-1} \frac{h}{\pi D}$

b/d_e 截面形状比

l/d_e 流道相对长度

ε/d_e 相对粗糙度

在螺旋回热器中,由于存在离心力的影响,所以,用迪恩准数代替雷诺准数更合适一些。把几何参数对摩擦系数的影响归入常数项,由式(3)可得:

$$f = c D_e^{b_1} \quad (4)$$

式中, $C = c_1 \left(\frac{d_e}{D} \right)^{b_2} \frac{1}{2} b \left(\frac{h}{D} \right)^{b_3} \left(\frac{b}{d_e} \right)^{b_4} \left(\frac{1}{d_e} \right)^{b_5} \left(\frac{\varepsilon}{d_e} \right)^{b_6}$ (5)

在螺旋回热器中,由于存在二次流场,故增大了流体质点的湍动,这将使螺旋回热器的流体阻力比直管大。同样,由于二次流场的存在,扼制了流体质点的不规则运动,故将使螺旋回热器中的临界雷诺准数比直管中的大。

为了保证精确的流道几何形状并使实验模型具有良好的耐蚀性能,我们用青铜棒车制成了实验模型内件,外壳用厚0.2mm的黄铜皮缠绕在内件上并加以锡焊,这样便制成了实验模型。实验模型主要几何尺寸如下:

流道中心螺旋线升角 $\varphi = 7.46^\circ$

流道中心螺旋线直径 $D = 43.74 \text{ mm}$

螺 距 $h = 18.00 \text{ mm}$

流道当量直径 $d_e = 8.53 \text{ mm}$
 流道截面宽 $b = 6.06 \text{ mm}$
 流道长度 $l = 1386 \text{ mm}$

其中,流道当量直径是根据文献[3]由数值计算得到的。

图1为实验流程图。实验介质用蒸馏水。通过继电器控制电加热器,把水温控制在 $17 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 。考虑到螺旋回热器水平放置时其流道内有大量气泡不易排除,影响测量精度,故把螺旋回热器垂直放置。流体流量用经过校准的孔板及倒置U形管测量。流体压力降的测量,在压力降较小时,用倒置U形管测量;在压力降较大时,用水银U形管测量,以提高测量数据的精度。

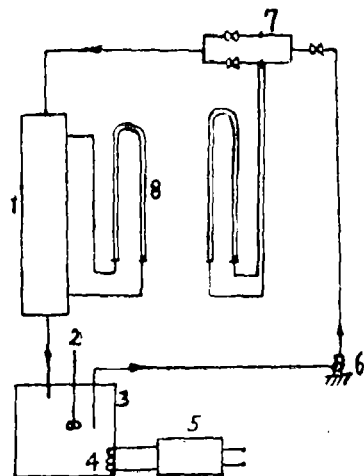
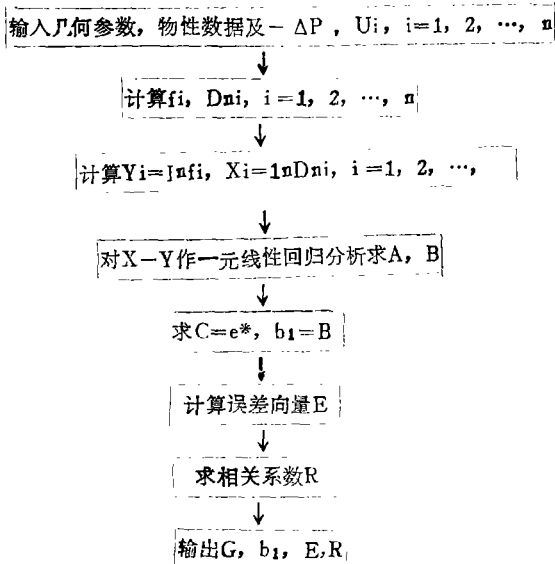


图1 实验流程图 1.螺旋回热器, 2.搅拌器, 3.恒温槽, 4.加热器, 5.继电器, 6. 水泵, 7孔板流量计, 8.U形管压差计

二、数据处理及实验结果

本文作者编制了处理实验数据的计算机程序, 程序框图如下:



实验数据处理结果如下:

$$\text{在层流区: } f = 123 D_n^{-0.866} \quad D_n = 1900 \sim 4500 \quad (6)$$

$$\text{在滞流区: } f = 2.99 D_n^{-0.427} \quad D_n = 5200 \sim 15700 \quad (7)$$

两个回归方程式的相关系数均等于 -1。根据多次测量量与其平均值的残差计算得到的实验点标准方差为 1.3×10^{-4} 。在层流区, 实验值与预报值最大偏差为 1.7%, 平均偏差为 1.1%; 在湍流区, 实验值与预报值最大偏差为 3.9%, 平均偏差为 1.6%。把由实验数据计

算得到的实验点及回归得到的方程式〈6〉、〈7〉在双对数坐标上标绘出来,如图2所示。从图2也可看出,实验点分布在回归方程式的左右,实验值与预报值偏差很小。

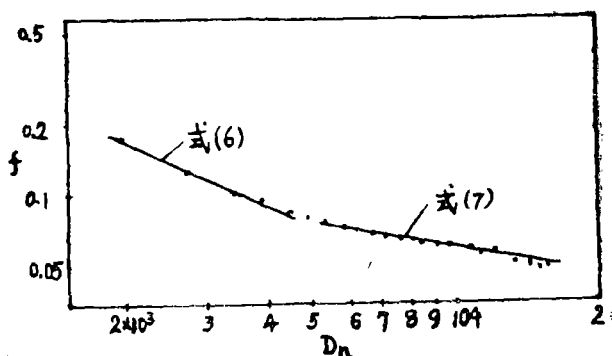


图2 f 与 D_n 的标绘图

从图2可以看出,在螺旋回热器中,临界迪恩准数约为4500到5200,相当于临界雷诺准数为10200到11800。这与 I_{10} 等人〔8〕研究得到的圆形成截面螺旋蛇管的临界雷诺准数是比较接近的。这与前面的分析结果也是一致的。

在螺旋回热器中,由于流体端动大,存在二次流场,使得其流体阻力比直管的大。实验结果证明了这一点。由光滑直管中的摩擦系数关系式: $f_s = 0.3164k_s^{-0.25}$ (8) 得到下面两个方程式:

$$\text{在层流区: } \frac{f}{f_s} = 789R_e^{-0.616} \quad R_e = 4440 \sim 10200 \quad (9)$$

$$\text{在湍流区: } \frac{f}{f_s} = 13.4R_e^{-0.177} \quad R_e = 11800 \sim 36000 \quad (10)$$

f/f_s 与 R_e 的标绘如图3所示。从图3可以看出,在实验范围内, f/f_s 在2~5之间。

三、结 论

〈一〉本文通过实验得到了螺旋回热器中摩擦系数与迪恩准数的经验方程,并推荐应用于工程计算。

在层流区: $f = 123D_n^{-0.868}$

适用范围 $D_n = 1900 \sim 4500$

在湍流区: $f = 2.99D_n^{-0.427}$

适用范围 $D_n = 5200 \sim 15700$

〈二〉在螺旋回热器中,由于不均匀分布的离心力场而产生的二次流场的存在,扼制了流体质点的不规则运动,因而其临界雷诺准数比直管的大。本文通过实验得到的螺旋回热器的临界迪恩准数为4500~5200,相当于临界雷诺准数为10200~11800。

〈三〉在螺旋回热器中,其流体阻力比直管大。本文在 $R_e = 4300 \sim 36000$ 的实验范围内得到,螺旋回热器与光滑直管的摩擦系数之比在2到5之间。

螺旋回热器的传热性能比直管好,但其流体阻力也比直管大。因此,寻找一种比较合理

的评价方法来评价螺旋回热器的经济性能是十分必要的,这也是我们将要进行的工作。

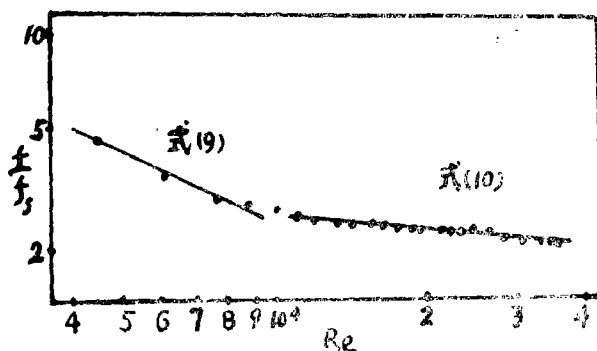


图3. 螺旋回热器与直管的摩擦系数比较图

参 考 文 献

- [1] Terra Tek, Inc, "High temperature range recuperator Phase II final report Prototype and material and analytical studies", DOE/CS/40012-2(A43)
- [2] Liu Ming-Kang, H, P, Sheng and Ku Ta-Tian, A study on convective heat transfer in helical recuperator, Presented at the Winter Annual Meeting of ASME, Miami Beach, Florida—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, Vol, 15, No. 7, 1986. P21
- [4] 黄卫星, 矩形螺旋管中层流流动的研究, 成都科技大学研究生论文, 1984.
- [5] B, Joseph and E, P, Smith et, el, Numerical treatment of laminar flow in helically coiled tube of square cross section, AIChE, J, Vol, 21, NO. 5, 1975, P965-974.
- [6] K, C, Cheng and Misunobu, Laminar forced convection heat transfer in curved rectangular channels, Int J Heat Mass Transfer, Vol, 10, P1121-1123, 1967.
- [7] L, C. Truesdell and K, I. Adler, Numerical treatment of Fully developed laminar flow in helically coiled tube, AIChE J, Vol, 16, No. 6, 1970, P1010-1015.
- [8] A. J. Ward-Smith, Internal Fluid Flow, 1980, P268-270.

THE FRICTION RESISTANCE IN HELICAL RECUPERATOR

Wang Yan-min

(Chemical Engineering Department)

Abstract

This paper deals with the friction resistance of the helical recuperator under the principle of similitude. Water is used as fluid medium, the pressure drops are measured, and over a quitewide range of Dean number, the relations between the friction factor and Dean number are found for laminar flow and turbulent flow by means of the least squares curve fit of experimental data. The results show that the critical Reynolds number and the friction resistance in the helical recuperator are all larger than that in a smooth straight pipe.

Key Words: Helical recuperator, friction resistance, pressure drop