

# 管内插入物单相流体强化传热的实验研究

董 珊 刘殿殿 吴永红

(哈尔滨建筑工程学院)

〔提要〕 采用管内插入物增强锅炉烟管的放热系数是行之有效的办法，它不影响换热器的机械强度，便于拆装、检修和更换。在设计烟管锅炉，特别是改造烟管锅炉中，它是最有希望的强化传热方式之一。本文介绍了内插物强化传热实验装置的设计调试，及其一种内插件——螺旋线圈强化传热的实验研究和有关理论探讨。

主题词 强化传热 火管锅炉 改造

现代工业中，工业锅炉作为经济建设及人民生活设施中的重要设备，消耗着大量的能量。就我国而言，仅工业锅炉消耗的煤量就约占全国原煤产量的三分之一。

目前，烟管锅炉的应用在小型锅炉中占较大比重。由于烟管内烟气的放热系数较低，排烟温度偏高，从而导致锅炉热效率很低。要想提高锅炉热效率，降低排烟温度以节约能源，一是增加烟管受热面，这会导致钢耗量增大，锅炉体积过大；二是增大烟管内烟气的对流换热系数，这就需要采用强化传热措施。只有采用第二种方法，才能达到既提高锅炉效率、节约能源，又可降低钢耗量、降低成本的目的。

强化传热技术可以分为两大类：

(1) 无功法 (Passive Methods)：它不需要直接应用外动力。主要包括表面处理、表面粗糙、扩展表面、管内插件、表面张力装置、液体添加剂、气体添加剂等。

(2) 有功法 (Active Methods)：它需要外动力。主要包括机械辅助、表面振动、流体振动、静电场、流体注入法或抽吸法等。

上述各种强化方法中，管内插入物强化方式有以下显著特点：(1) 不改变传热面形状，使得换热器的机械强度不受损害；

(2) 拆装方便，便于检修和更换插件；(3) 一般插件加工简单，可以在较低成本下大量生产；(4) 特别适用于现有设备改造工程。由于这些特点，使得插入物强化元件成了火管锅炉的改造及设计工程中最有希望的强化方式。

但是，到目前为止，国内外都缺乏锅炉用插件的系统研究资料。

为了提高人们的注意，推动新型高效火管锅炉的问世，作者在一空气实验台上，对几种型式的插件进行实验研究，特别对螺旋线圈强化管作了较详细的讨论。

## 一、实验台介绍

实验台装置如图1。

实验台主要由以下部分组成：风机系统、流量测量系统、空气加热箱、测温系统、测压系统、冷却水系统。

### 1. 风机系统

假定试验管中空气流速为6~30m/s，通过整个风系统的阻力估算，本实验中采用了9—19—5A型高压离心风机。其风量为1610~3864m<sup>3</sup>/h，风压为5~5.7kPa(508~585mmH<sub>2</sub>O)。风量调节可借助风机入口的光圈阀与风机相连的静压箱上的旁通阀实现。



螺旋线圈是一种简单易行的强化传热元件,制造特别简单,金属耗量最低。由于一般线径较小,故诱发流体旋转的能力较弱。其强化传热机理主要是使流体边界层得以周期性扰动和促进紊流核心流体与边界层内流体的混合而实现的。由于线圈与管壁接触面非常小及装配公差等因素,使得其肋效应也可以忽略。实验结果表明,这种强化元件可以在阻力增加不大的情况下,使传热得到相当的增加。

实验是在冷却情形下进行的。工质为空气,试验管内径  $D = 62.66\text{mm}$  实验条件为  $20000 < Re < 55000$ ,  $0.68 \leq Pr \leq 0.704$ 。实验结果整理为下列方程形式:

$$Nu_a = C_1 Re^n \quad (3)$$

$$\xi_a = C_2 Re^n \quad (4)$$

通常,强化传热换热器与普通换热器的工作效应对比分为三种情况:(1)在换热功率、工质流量与压力损失相同时,比较两者的换热面积和体积;(2)在换热器体积、工质流量与压力损失相同时,比较两者的换热功率;(3)在换热器体积、换热功率与工质流量相同时,比较两者的压力损失。

**第一种工作效应对比的评价准则数**

$$Q_a = Q \quad (5)$$

$$G_a = G \quad (6)$$

$$\Delta P_a = \Delta P \quad (7)$$

式中角标  $a$  表示采用强化技术换热器,以下同。

$$\begin{cases} Q_a = \alpha_a \Delta T_o \pi d L n_a \\ Q = \alpha \Delta T_o \pi d L n \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $d, L$ ——管子内径及长度,  $m$   
 $n$ ——管子数目

$\Delta T$ ——平均传热温差,  $K$

$\alpha$ ——管内放热系数,  $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot K)$

假设两种换热器中传热温差  $\Delta T_o = \Delta T$

(这个假设只能是近似的,因为随着  $\alpha$  的提高,采用强化技术的换热器中的平均传热温度差要下降)。于是有:

$$\alpha_a \cdot L_a \cdot n_a / \alpha \cdot L \cdot n = 1 \quad (9)$$

由  $\Delta P_a = \Delta P$  得:

$$\xi_a \frac{L_a}{d} \frac{\rho W_a^2}{2} = \xi \frac{L}{d} \frac{\rho W^2}{2}$$

$$\text{即: } \frac{\xi_a}{\xi} \cdot \frac{L_a}{L} \cdot \frac{W_a^2}{W^2} = 1 \quad (10)$$

式中  $\xi$ ——管内摩擦阻力系数

$W$ ——管内工质平均流速,  $m/s$

由  $G_a = G$  得:

$$Re_a / Re = W_a / W = n_a / n \quad (11)$$

一般普通换热器中有如下关系:

$$\begin{cases} Nu = C_1 Re^{0.8} \\ \xi = C_2 Re^{-0.2} \end{cases} \quad (12)$$

$$\xi = C_2 Re^{-0.2} \quad (13)$$

于是

$$Nu_a = (Nu_a / Nu) Re_a \cdot C_1 \cdot Re_a^{0.8} \quad (14)$$

$$\xi_a = (\xi_a / \xi) Re_a \cdot C_2 \cdot Re_a^{-0.2} \quad (15)$$

将  $Nu = \alpha \cdot d / \lambda$  及式 (12)、(13) 代入式 (14)、(15) 得:

$$\alpha_a / \alpha = (Nu_a / Nu) Re_a \cdot (Re_a / Re)^{0.8} \quad (16)$$

$$\xi_a / \xi = (\xi_a / \xi) Re_a \cdot (Re_a / Re)^{-0.2} \quad (17)$$

由式 (9) ~ (11) 及式 (16)、(17) 得:

$$\frac{n_a}{n} = \frac{(\xi_a / \xi)^{0.5} Re_a}{(Nu_a / Nu)^{0.6} Re_a} \quad (18)$$

$$\frac{L_a}{L} = \frac{1}{(Nu_a / Nu)^{0.9} Re_a (\xi_a / \xi)^{0.1} Re_a} \quad (19)$$

假设进行对比的两种换热器中管子的节距相同,则其横截面积之比

$$\begin{aligned} A_a / A &= n_a / n \\ &= (\xi_a / \xi)^{0.5} Re_a / (Nu_a / Nu)^{0.5} Re_a \end{aligned} \quad (20)$$

其体积比为

$$\begin{aligned} V_a / V &= \frac{A_a}{A} \cdot \frac{L_a}{L} \\ &= (\xi_a / \xi)^{0.4} Re_a / (Nu_a / Nu)^{1.4} Re_a \end{aligned} \quad (21)$$

其换热面积比为:

$$\begin{aligned} F_a / F &= V_a / V \\ &= (\xi_a / \xi)^{0.4} Re_a / (Nu_a / Nu)^{1.4} Re_a \end{aligned} \quad (22)$$

**第二、三种工作效应对比的评价准则数**

依据相似的推导,分别得:

$$Q_a / Q = (Nu_a / Nu) Re_a / (\xi_a / \xi)^{0.286} Re_a \quad (23)$$

$$\Delta Pa / \Delta P = (\xi_a / \xi) Re_a / (Nu_a / Nu)^{3.5} Re_a \quad (24)$$

由前面推导可知，当  $(Nu_a / Nu)^{3.5} > (\xi_a / \xi)$  时，在换热器中采用强化技术总是有效的。

依据本实验台测得的光管关系式  $Nu = 0.0185 \cdot Re^{0.8}$ ， $\xi = 0.176 Re^{-0.2}$  以及式(22) ~ (24)，对实验中的8种螺旋线圈强化管数据进行处理，可以得到如图(3) ~ (5)的性能评价曲线。

由图可以明显看出，螺旋线圈强化元件可以使紊流空气的传热得以有效增强。就图3而言，在换热功率，工质流量与压力损失相同的情况下，采用强化技术的换热器较普通换热器可节省换热面积近24%，效果是显著的。

另外，从以下几图还可以发现，螺旋线圈强化管的综合强化性能是随着雷诺数的升高而降低的。

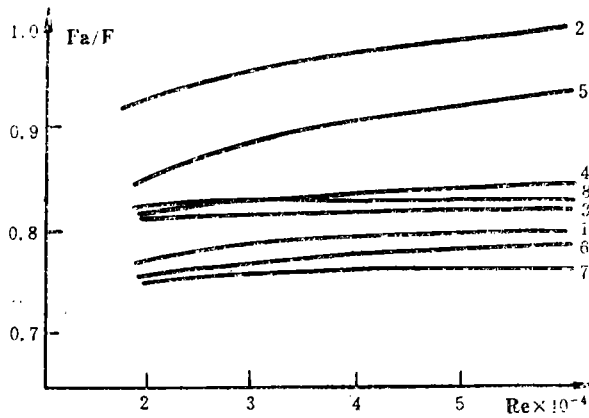


图3 螺旋线圈强化管的性能比较图

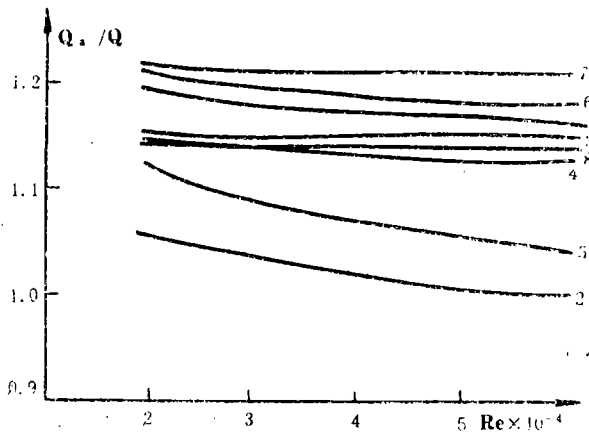


图4 螺旋线圈强化管的性能比较图

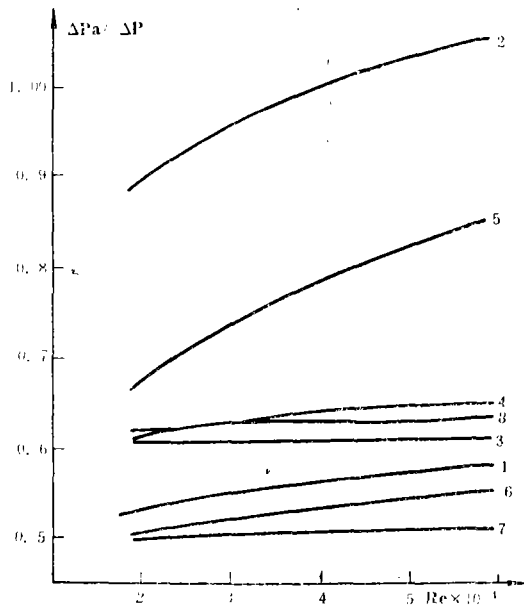


图5 螺旋线圈强化管的性能比较图

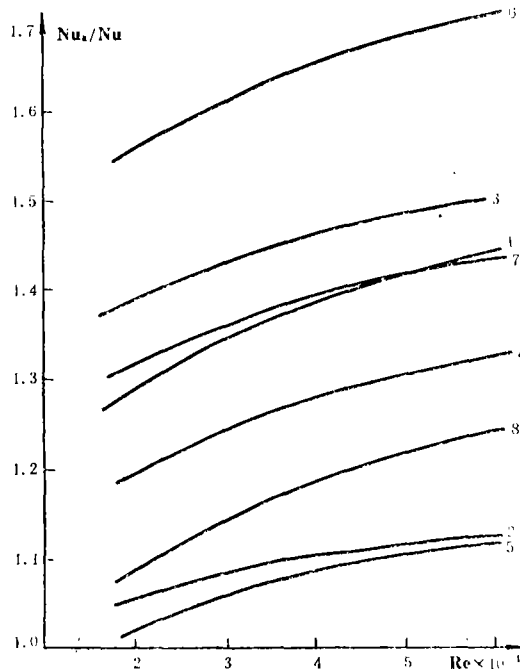


图7 螺旋线圈强化管的  $Nu_a/Nu \sim Re$  曲线

在现有锅炉的改造工程中，往往有这样的情形：即风机压头尚有富余，为了最大限度地提高传热率，可以允许压降损失在一定范围内增大，这时就需要参照强化管与普通

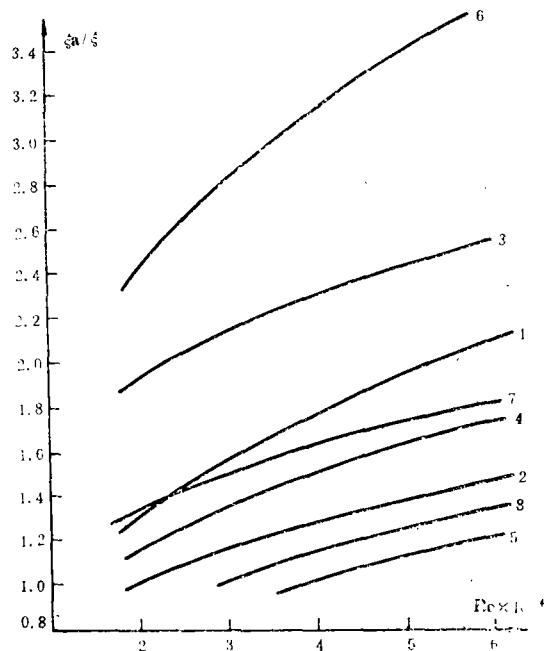


图6 螺旋线圈强化管的  $\xi_a/\xi \sim Re$  曲线  
管子的传热及阻力的相对关系，作出适当选择。因此下面就给出  $Nu_a/Nu \sim Re$  及  $\xi_a/\xi \sim Re$  关系曲线。见图6、7。

由图可见，若允许阻力降增加1倍强，就可以使放热系数增加近50%。而在实际应用中，阻力增加为光管的几倍乃至十几倍，完全是可以允许的。例如，有一光管内径  $D = 62.66\text{mm}$ ，管内空气温度  $t = 600^\circ\text{C}$ ，流速  $u = 20\text{m/s}$ ，则按光管公式  $\xi = 0.184Re^{-0.2}$  计算出的压降值为  $35.6\text{Pa/m}$  ( $3.63\text{mmH}_2\text{O/m}$ )。因此阻力增加1倍，压降也只有  $71.2\text{Pa/m}$  ( $7.26\text{mmH}_2\text{O/m}$ )，在工业上完全可行。

为了得到统一的传热关系式，作者采用曲线拟合的方法，得到了实验范围内的如下关系式：

$$Nu_a = 0.0316Re^{0.877}(P/D)^{-0.2761} \cdot (2dd/D)^{0.3653} \quad (25)$$

#### 四、结束语

实验结果表明，螺旋线圈是一种很有希望用于火管锅炉的强化元件。当然空气的性

质不同于烟气, 烟气中含有大量的 CO<sub>2</sub>、灰粒等, 它们的存在将使得传热进一步加强, 因此将本文取得的传热关系用于锅炉实际是安全的。

本文旨在促进人们对螺旋线圈强化元件在紊流流动中的应用增加关注。希望本文能够为加快螺旋线圈早日用于火管锅炉起到抛砖引玉的作用。

主要符号

- $d, D$ ——试验管内径, m
- $dd$ ——金属丝直径, m
- $H, h$ ——试件高度, m
- $p$ ——试件节距, m
- $t$ ——试件厚度, m
- $W$ ——试件宽度, m
- $Re$ ——雷诺数
- $Nu$ ——努谢尔特数
- $Pr$ ——普朗特数
- $\alpha$ ——对流放热系数, kW/m<sup>2</sup>·°C

- $\xi$ ——沿程阻力系数
- $\Delta P$ ——压降, Pa
- $Q$ ——热流率, kW/m<sup>2</sup>
- $F$ ——换热面积, m<sup>2</sup>

角标

- $a$ ——强化管

参 考 文 献

- [1] Megerlin F E, Murphy R W, Bergles A E. Augmentation of Heat Transfer in Tubes by use of Mesh and Brush Inserts. Journal of Heat Transfer, May 1974, 99
- [2] Lin S T, et al. Proceedings of the 1978 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute. P117-130, Stanford University Press, Stanford California, 1978
- [3] Junkhan G H, Bergles A E, Nirmalan V, Ravigurajan T. Investigation of Turbulators for Fire Tube Boilers. Journal of Heat Transfer, May 1985, 107
- [4] Мураш В К. Теплоэнергетика. 1968, (11)

## An Experimental Study on Single-Phase Fluid Heat Transfer Strengthened by Inside-Tube Inserters

Dong Shan, Liu Diandian, Wu Yonghong

(Harbin Institute of Architectural Engineering)

### Abstract

The use of inserters inside boiler smoke tubes to increase the heat release coefficient of the smoke tubes is a practical and effective means having advantages of being easy to be removed, reinstalled, repaired and replaced without adverse effects on the mechanical strength of the heat exchanger. In designing, and especially in modifying a smoke-tube boiler, this is one of the most promising approaches to strengthen the heat transfer. Presented in this paper is a description of the design and testing of an experimental set-up for heat transfer strengthened by use of inserters inside tubes and an experimental study and related theoretical investigation on strengthened heat-transfer by inside-tube coil inserters.

Key Words: strengthened heat transfer, fire-tube boiler