

# 管内复合强化传热技术及机理分析

(江苏省电力试验研究所) 高小涛

**[摘要]** 文中对管内强化传热及复合强化传热技术进行了在紊流流动下的阻力和传热特性分析,并给出了几种复合强化传热技术的试验研究结果,提出螺旋槽管中插入旋向相反的部分管长扭带是行之有效、效果明显的复合强化传热技术。

**关键词** 强化传热 复合强化传热 螺旋槽管 扭带

**中图分类号** TK 124

## 1 前言

随着强化传热技术的迅猛发展,强化传热技术已开始应用于动力、冶金、石油化工、制冷工程以及空间、电子、核能等高科技领域。近来,人们已经开始对复合强化传热技术进行研究。所谓复合强化传热技术,即两种或两种以上的强化措施同时应用,以期获得更大传热强化效果的技术。复合强化传热技术要求所采用的几种强化措施,能够配合默契以发挥其各自的特长,从而取得增强传热的更好效果。随着强化传热技术的推广应用,许多换热设备改造设计中已采用这一技术,根据强化措施的换热设备运行需要,有可能还需增加传热效果,而复合强化传热技术则提供了解决这一问题的可能。

## 2 几种管内复合强化传热机理分析

广泛应用的管内传热强化方法有二类:一是管内造成流体旋流;二是采用各种各样粗糙表面。

能在管内产生旋流的专门元件,也称旋流发生器。当旋流器安装在管子进口时,称为进口旋流器,它产生衰减性旋流。旋流器出口处,流体的旋流强度最大,旋流强度沿流体流动方向逐渐下降,进口旋流器一般适用于短管( $L/D \leq 50 \sim 100$ )换热器。当旋

流器沿管子全长安放时,所产生的旋流为非衰减性旋流(如管内扭带插入物就是这种旋流器)。管内流体的旋流运动具有与一般流体不同的特点,它除有轴向流速分量外,还有切向流速分量。管内有旋流时,切向速度的分布有其自身规律,即在靠近壁面区域,切向速度反而随径向距离的增大而降低。靠近壁面稍远的流体质点,则因受较大的离心力,将向壁面方向移动,因此,在靠近壁面的流体中,离心力的作用将使流体湍流混合加强,减少了靠近壁面的层流底层的热阻,这显然对管内换热的强化有利。在旋转流体中,切向速度分离的存在使运动流体受到一个离心力的作用。在流体加热的情况下,离心力明显地加强了分子的扩散作用,使流体传热得以强化。

粗糙表面用于强化管内流体的换热,在工业上得到广泛的应用。当壁面邻近的流体流经粗糙物时,在粗糙物端部发生边界层的分离,在分离区形成流体旋涡(涡流),在外面有自由剪切层。分离流体在大约 $(5 \sim 8)h$ 的距离上又重新与壁面接触,此后边界层又开始发展。边界层分离所产生的流体旋涡与流体剪切层的相互作用使流体湍流度增加。此外,分离流体与壁面的重新接触,好象一股射流冲击在壁面上,使邻近流体换热强度提高;边界层的分离和流体与壁面的重新接触,使流体换热得以强化。

对于管内插入螺旋条,不要求管内全部流体产生旋转,被引导作旋转运动的只是壁面附近与螺旋条插入物接触的部分流体,而且,插入物与流体接触的表面积也增加不多,可以预见,阻力的增加将比管内插入扭带时小。螺旋条插入物除可使管内部分流体产生旋转外,还在壁面造成边界层的分离,在分离区域产生涡流。与流体跨过凸出物(螺旋条)后,接着发生扩散,并在离凸出物不远处与壁面重新接触。在流体与壁面重新接触的地方,由于流体对壁面具

有类似于冲击作用,换热强度很高。当螺旋条插入物的相对高度  $h/D$  较小时,流体的旋转作用不明显,对流体流动和换热主要作用的是流体边界层从壁面的分离和接着而来的重新接触。

对于采用滚压方法加工出的螺旋槽管内强化传热技术来说,浅槽螺旋槽管主要通过流体边界层的分离所产生的涡流和壁面的重新接触来强化管内换热,流体旋转起的作用较小。对于深槽螺旋槽管,其节距一般选得较大,对流体换热强化起主要作用的因素是流体旋转,正由于节距较大,边界层分离的影响相对较小些。

上面所说管内造成流体旋流及采用各种粗糙表面以破坏壁面边界层较好结合起来,取长补短,可能会得到较好的传热效果。在螺旋槽管内插入扭带或在螺旋槽管进口加装旋流器,就是基于螺旋槽管主要通过流体边界层分离所产生的涡流与流体和壁面的重新接触来强化管内换热的,而扭带或旋流器主要通过使流体产生旋流从而加强流体混合,促进管内流体速度和温度分布的均匀,从而强化管内换热。可以预见,若扭带或进口旋流器与螺旋槽管配合适

当,则会产生更好的传热效果。对于在螺旋槽管内插入螺旋条的复合强化技术,一方面基于螺旋槽管和螺旋条通过造成流体边界层分离所产生的涡流和流体与壁面的重新接触来强化传热,另外可通过螺旋条产生部分流体旋转来强化传热;这种复合强化传热方法比较适合在采用螺旋槽管强化传热技术而强化传热效果已经降低时采用。

螺旋槽管内插入扭带或加装进口旋流器后管内流体阻力后,管内流体阻力会增加。因为:(1)螺旋槽管内螺旋槽引起流体边界层分离所造成的流动阻力;(2)轴向流动均匀化的二次流引起的附加流动阻力;(3)切向运动的引入,使切向运动克服壁面剪应力引起的流动损失;(4)对于扭带、摩擦面积的增加造成压力损失。这也可看出,若两种强化传热技术简单复合,则可能因为阻力增加过大,造成总的强化传热性能反而下降。这就存在几种强化方法间的优化组合、配合默契的问题。

### 3 试验研究结果

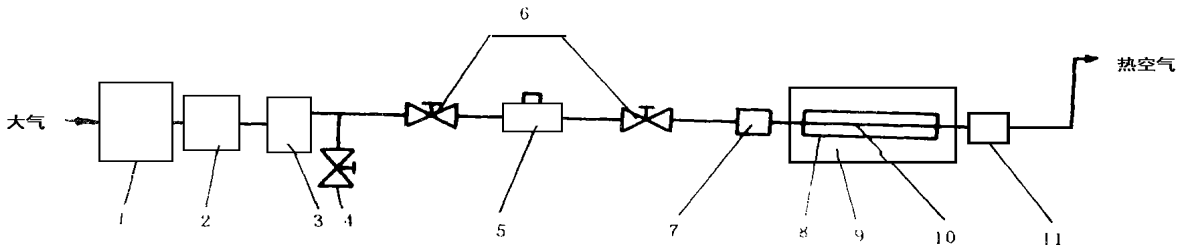


图 1 试验台系统图

在如图 1 所示的强化传热试验台上,进行了光管中插入扭带、进口加装旋流器、插入弹簧条及螺旋槽管等单一强化传热技术的试验研究,以及螺旋槽管内插入扭带、进口加装旋流器、插入弹簧条等几种复合强化技术试验研究。试验结果见图 2 图 3 图 4 和图 5 强化传热元件结构参数见表 1 表 2 和表 3。

表 1 2 旋流器结构参数

叶片数	出口角	进口角	叶片内径	叶片外径	进口轴向长	总长	叶片导程
6	50.1°	0°	17.8 mm	36.8 mm	30.0 mm	105.0 mm	60.0 mm

表 2 扭带结构参数 (单位: mm)

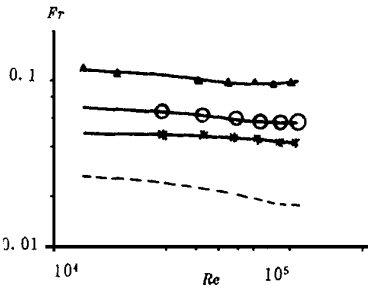
名称	扭向	宽度	长度	节距
2# 扭带	逆时针	35	1798	90
3# 扭带	顺时针	31.5	889	90
4# 扭带	顺时针	31.5	1798	90

表 3 弹簧条结构参数 (单位: mm)

名称	外径	长度	弹簧条直径	节距	扭向
1# 弹簧条	36.5	2200	4	103	顺时针
4# 弹簧条	32.0	2200	3	100	顺时针

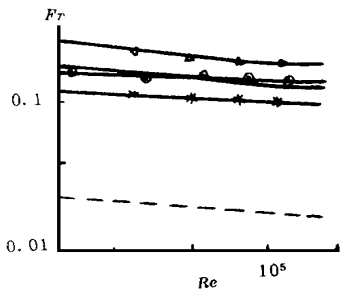
阻力试验:在  $Re = 1.2 \times 10^4 \sim 1.1 \times 10^5$ ,光管中加装 2# 旋流器,插入 2# 扭带和插入 1# 弹簧

条,阻力系数分别比光管提高了 2.91~4.45 倍、0.93~1.39 倍和 1.63~2.17 倍;在  $Re = 3.0 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$ ,螺旋槽管 ( $P = 16 \text{ mm}, h = 1.2 \text{ mm}$ ) 中加装 2 旋流器、插入 4 弹簧条、插入 3、4 扭带,阻力系数分别比光管提高了 8.86~9.45 倍、5.67~6.41 倍、3.91~4.29 倍和 5.71~6.41 倍。传热试验:在  $Re = 1.8 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$ ,光管中加装 2 旋流器、插入 2 扭带和插入 1 弹簧条,换热系数分别比光管提高了 0.79



△ 光管加装 2 旋流器  
\* 光管内插入 2 扭带  
○ 光管内插入 1 弹簧条  
——光管

图 2 管内强化传热技术阻力试验部分结果



△、○、\*、+ 分别表示螺旋槽管进口加装 2 旋流器及螺旋槽管内插入 4 弹簧条、插入 2 扭带和 4 扭带,  
——表示光管

图 3 管内复合强化传热技术阻力试验部分结果

~ 1.28 0.68~ 0.70 倍和 0.82~ 1.01 倍;在  $Re = 2.5 \times 10^4 \sim 1.1 \times 10^5$ ,螺旋槽管内进口加装 2 旋流器、插入 4 弹簧条、插入 3、4 扭带,换热系数分别比光管提高了 1.21~ 1.50 倍、1.0~ 1.43 倍、1.18~ 1.53 倍及 1.21~ 1.91 倍。

根据文献 [1] 及 [2] 给出的强化传热管的性能评价准则:

$$Q/Q_0 = (Nu/Nu_0)_{Re} \cdot (A/A_0)_{Re}^{-0.29}$$

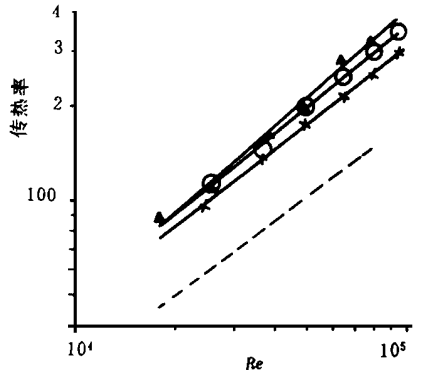
在  $Re = 5 \times 10^4$  附近,在相同输送功率、相同换热面积下,对试验结果进行性能评价得到: (1) 光管中加装 2 旋流器、插入 2 扭带及插入 1 弹簧条时,热量分别比光管提高了 25.4%、37.9% 及 44.7%; (2) 螺旋槽管内进口加装 2 旋流器、插入 4 弹簧条、插入 3、4 扭带,热量分别比光管提高了 24.4%、25.8%、53.4% 和 66.8%。

### 4 结论

通过对管内强化传热技术的分析和试验研究,可以得到以下结论:

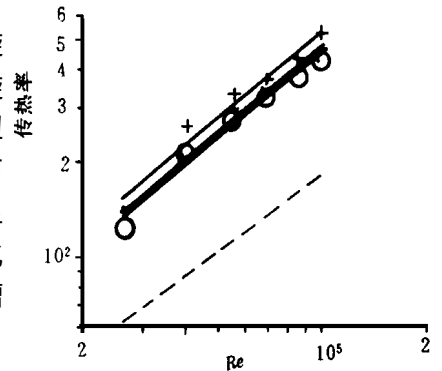
(1) 通过造成管内旋流及采用粗糙表面来实现管内换热强化是行之有效的技术,对于提高换热器效率,节约能源有重要意义。

(2) 螺旋槽管插入旋向相反的扭带是行之有效的,效果明显的复合强化技术。螺旋槽管内插入 4 扭带时,在  $Re = 5 \times 10^4$  附近,相同输送功率、相同换热面积下,热量比光管提高了 66.8%。



△ 光管加装 2 旋流器  
\* 光管插入 2 扭带  
○ 光管内插入 1 弹簧条  
——光管

图 4 管内强化传热技术传热试验部分结果



△ 螺旋槽管进口加装 2 旋流器  
○ 螺旋槽管内插 4 弹簧条  
\* 插入 3、4 扭带  
——光管

图 5 管内复合强化传热试验部分结果

### 参考文献

- 1 webb R L, et al. Application of rough surface to heat exchangers design. Int. J. Heat Mass Transfer, 1972, 15 1648 ~ 1658.
- 2 高小涛.管内空气强迫对流换热的强化及复合强化的研究.东南大学硕士论文,1992. (辉 编)  
作者简介 高小涛 男 1967年生 工程师.主要从事电站锅炉燃烧、传热强化等研究以及锅炉性能试验和调试工作.通讯处 210029 南京市 江苏省电力试验研究所锅炉室。

Yiqin // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 415~ 417

To fully utilize the low-temperature exergy of liquid hydrogen, installed additionally in a hydrogen energy-based gas turbine cycle is an air precooler and hydrogen turbine. Such a cycle enjoys a significant enhancement in specific power, thermal efficiency and exergy efficiency as compared with a simple cycle gas turbine. A thermodynamic analysis of the liquid hydrogen-gas power cycle is conducted and the latter's superior power performance predicted. Key words hydrogen energy-based gas turbine cycle, low-temperature exergy, thermal efficiency, analysis

管内复合强化传热技术及机理分析 = **In-tube Combination Intensified Heat Transfer Technology and An Analysis of its Mechanism** [刊, 中] / Gao Xiaotao ( Jiangsu Provincial Electric Power Test & Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 418~ 420

With respect to in-tube intensified heat transfer and combination intensified heat transfer technology presented in this paper is an analysis of resistance and heat transfer characteristics under turbulent flow conditions. Experimental research results of several kinds of combination intensified heat transfer techniques are also given. It is pointed out that the insertion of a partial tube length twisted tape with a counter rotation in a spiral-corrugated tube can be regarded as a highly effective combination intensified heat transfer technique. Key words intensified heat transfer, combination intensified heat transfer, spiral-corrugated tube, twisted tape

碳钢-水热虹吸管内部强化传热机理研究 = **A Study of the Internal Intensified Heat transfer Mechanism of a Carbon Steel-Water Thermosyphon Pipe** [刊, 中] / Sun Shimei ( Jiling Chemical Engineering Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 421~ 423

On the theoretical basis of a microlayer evaporation model an analysis is conducted of the intensified boiling heat transfer mechanism of thermosyphon pipe with an internally installed shunt tube structure. Set up is an internal boiling heat transfer model for a shunt tube intensified thermosyphon pipe. In addition, seven different kinds of perforated shunt tube structure have been selected for comparison with smooth tubes and for experimental study in order to seek an optimum shunt tube structure. A huge amount of experimental data is synthesized to establish a dimensionless number equation for intensified boiling heat transfer. Key words shunt tube, intensified boiling heat transfer, heat transfer model

煤颗粒流化床脱挥发份的实验研究 = **An Experimental Study of the Devolatilization of a Coal Particle Fluidized Bed** [刊, 中] / Zheng Shouzhong, Zeng Dong, Cai Song ( Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 424~ 426

A devolatilization test of coal particles was conducted on a small-sized fluidized bed test rig. Studied is the effect of bed layer temperature, coal type, ambient atmosphere and other factors on the changing behavior of such elements as C, H and N in the coal in the course of devolatilization. Key words coal fluidized bed, devolatilization

里克型脉动燃烧技术工程化应用实验研究 = **Experimental Research of Rijke Type Pulsating Combustion Technology and Its Engineering Applications** [刊, 中] / Zhong Yingjie, Chen Fulian, Shi Zhuling, et al (Zhe-