

文章编号:1000-582X(2011)01-116-05

螺旋管换热器同轴环形通道流动特性实验

赵振兴¹, 杨震^{1,2}, 郭琴琴², 刘宏¹, 曹子栋¹

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 上海锅炉厂有限公司, 上海, 200245)

摘要:对 $S/d_0=2.0$, $S/d_0=2.5$ 和 $S/d_0=3.0$ 的同轴环形通道螺旋管换热器分别进行了流动特性及阻力特性的实验研究, 并和圆形管道的理论值进行比较。得出流体流速、压力、流量及同轴环形通道的几何参数等对同轴环形通道流动特性的影响。结果表明: 在环隙宽度 S 和螺旋管外径 d_0 相同的条件下, 随着雷诺数 Re 的增加, 环形通道的进口阻力系数 ξ_{in} 、出口阻力系数 ξ_{out} 和总阻力系数 ξ_z 逐渐减小并逐渐趋于一定值; 外圈环形通道的 ξ_{in} 、 ξ_{out} 、 ξ_z 均比中圈和内圈环形通道的大, 但中圈和内圈环形通道的 ξ_{in} 、 ξ_{out} 、 ξ_z 相等; 相同雷诺数条件下, S 越小, 流体在环形通道流动时, 流体的进出口压力降 ΔP 就越大。

关键词:膜式螺旋管; 流动特性; 环形通道

中图分类号: TQ021.1

文献标志码: A

Experiments on flow characteristics in coaxial annular channel heat exchanger with membrane spiral tubes

ZHAO Zhen-xing¹, YANG Zhen^{1,2}, GUO Qin-qin², LIU Hong¹, CAO Zi-dong¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi

710049, P. R. China; 2. Shanghai Boiler Works LTD., Shanghai 200245, P. R. China)

Abstract: The coaxial annular channels' experimental platform is built to study its flow characteristics when $S/d_0=2.0$, $S/d_0=2.5$, $S/d_0=3.0$, and it is compared with circular pipe's theoretical value. The purpose is to study the influence of flow rate, pressure, flux, heat transfer temperature and geometric parameters on the coaxial annular channels' flow characteristics of spiral tube heat exchanger. The results show that for the same annulus width and outside diameter of spiral tube, annular channels' import, export and total resistance coefficients are decreasing and tend to constants gradually as Reynolds number increases; all the resistance coefficients of annular channel's outer ring are bigger than those of annular channel's middle ring and inner ring. But the resistance coefficients of annular channel's middle ring and inner ring are equal; under the same Reynolds number, the smaller the annulus width is, the bigger pressure drop of annular channel is.

Key words: membrane spiral tube; flow characteristics; annular channels

收稿日期: 2010-08-03

基金项目: 国家 863 高技术基金项目 (2007AA05Z265)

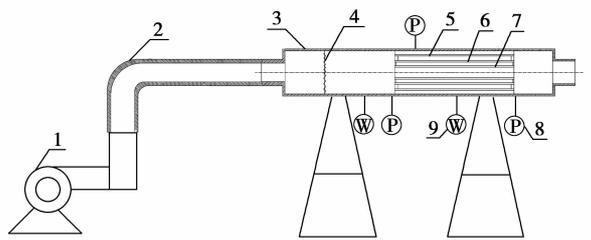
作者简介: 赵振兴 (1986-), 西安交通大学博士研究生, 主要从事煤粉加压气化炉换热及流动方面的研究。

曹子栋 (联系人), 西安交通大学教授, 博士生导师, (E-mail) pro_cao@163.com。

环形通道作为一种重要的传热通道形式^[1-3],在能源、动力、化工、核动力装置、石油开采及钻井工程等中有广泛的应用。研究其流动参数特性对换热器基础理论和工程实际具有重要作用。Kang 和 Zarate 为了进一步探究窄缝通道内的流动机理,通过实验测量了竖直同心环形管内流场和温度场分布以及轴向和径向的流速和温度波动^[4];Nouri 等^[4-7]对牛顿和非牛顿流体在半径比为 0.5 的环形管内的层流特性和紊流特性进行了实验研究,另外,还对较小直径比的内管旋转的环形管内的轴向摩阻也进行了一些实验研究,得出在一定的轴向雷诺数范围内,环形管的内管旋转将使摩擦压降有所增大;Sreenivasulu 等^[8]通过实验研究了覆盖有螺旋钢丝的环形通道的流动及换热特性;Sayed-Ahmed 等^[9]对内壁为旋转体的环形通道的进口段进行了实验研究。从以上的介绍可以看出,目前国内外研究^[10-14]的主要是流体在环形管内或窄缝环形管道内的流动和传热的研究状况,而对于流体在环形通道外做纵向流传热的情况研究得较少。特别是工程中对膜式螺旋管换热器壳程为同轴环形通道还没有相关介绍,鉴于环形通道重要的应用背景及已有研究的不充分性,笔者就流体流速、温度、压力、流量及几何参数对同轴环形通道阻力特性的影响进行了实验研究。

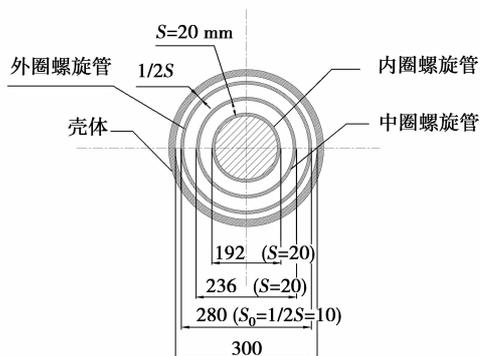
1 试验装置和方法

本实验采用环隙间距与螺旋管外径之比 $S/d_0 = 2.0, 2.5, 3.0$ 的 3 种同轴环形通道进行实验。每种装置由进口气流均流段、同轴环形通道实验段、出口气流排出段以及供风系统和测量系统 5 部分组成。实验时,在相同物性参数条件下,研究 $S/d_0 = 2.0, 2.5, 3.0$ 下同轴环形通道内空气的流动特性。实验装置示意图如图 1 所示,模式螺旋管结构及尺寸如图 2 和图 3 所示。

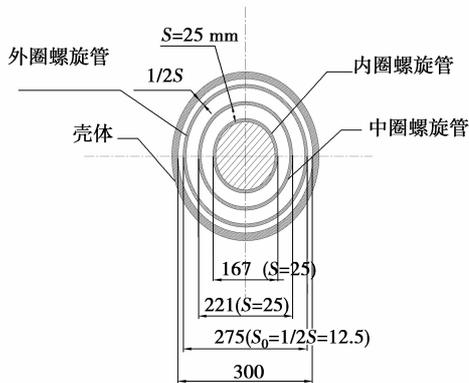


1. 风机;2. 塑料弯管;3. 套筒;4. 均流板;5. 外圈环形通道;
6. 中圈环形通道;7. 内圈环形通道;8. 精密压力计;
9. 热线风速仪

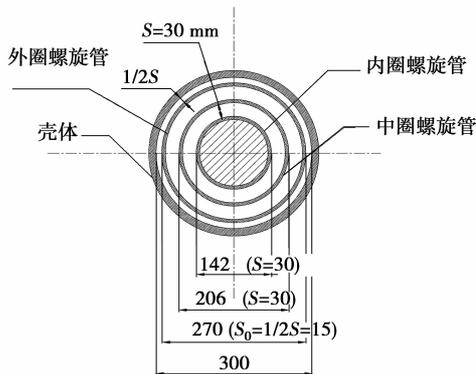
图 1 实验装置示意图



(a) $Sd_0=2.0$



(b) $Sd_0=2.5$



(c) $Sd_0=3.0$

图 2 $S/d_0 = 2.0, 2.5, 3.0$ 下的实验模型侧视图

本实验主要测量参数包括: 环形通道的进出口压力 P_1, P_2 , 距环形通道进口 5 mm 处的压力 P' , 距环形通道进口 400 mm 处的外圈、中圈、内圈 3 圈环形通道内流体的速度 w_1, w_2, w_3 , 套筒内的速度 w_4 。

本实验首先标定好热线风速仪及精密压力计。开启风机电源, 调节风机流量控制阀门, 维持环形通道内空气流量稳定于一较小值。先用精密压力计依次测量环形通道进口处、距环形通道进口 5 mm 处

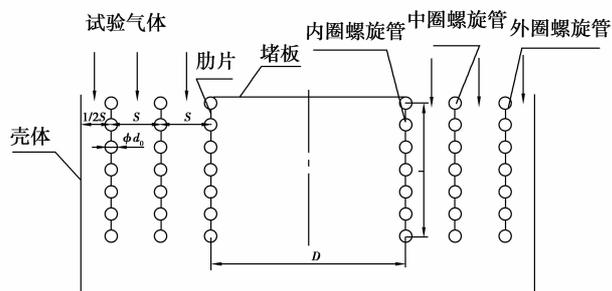
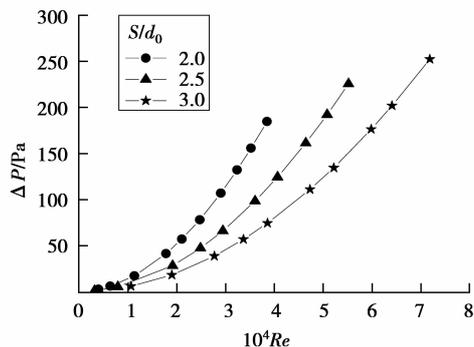


图 3 膜式螺旋管环形通道剖面图

及环形通道出口处的静压,然后再用热线风速仪测量距环形通道进口 400 mm 处的风速(此处横截面上均匀开 5 个孔,用热线风速仪来分别测量这 5 个孔中外圈、中圈和内圈环形通道里的速度,然后求平均值)。当压力值和风速值基本稳定不变,即压力波动小于 61.0 Pa,速度波动小于 60.2 m/s 时,说明环形通道内流动达到稳定状态,此时记录所有测量数据。然后调节风机流量控制阀门,使风机流量由小到大逐渐变化。当环形通道内空气流量稳定不变时,按照以上步骤来测量每处的压力和风速。重复以上操作步骤,多次测量并记录所有测量数据。

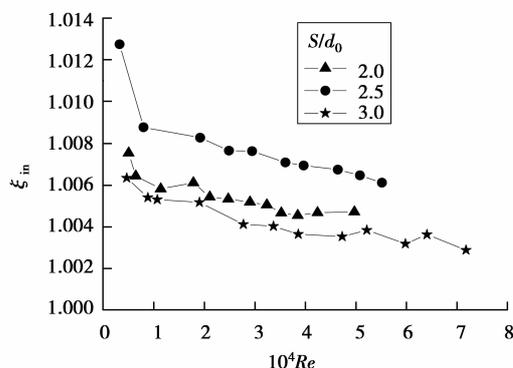
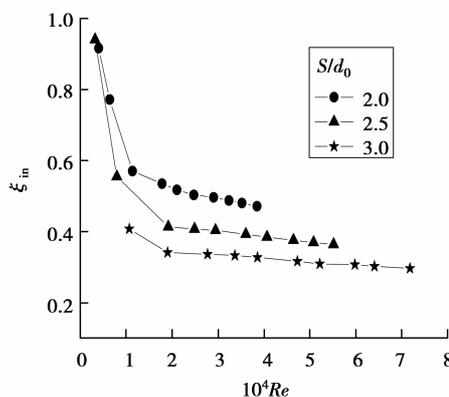
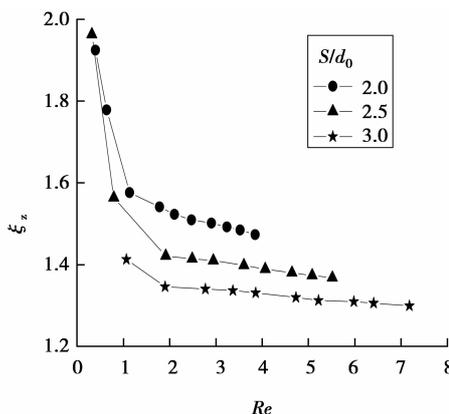
2 实验结果及分析

将 3 种同轴环形通道的实验结果进行对比,不同 S/d_0 条件下,中圈环形通道的 ΔP 、 ξ_{in} 、 ξ_{out} 、 ξ_z 和 Re (环形通道进口处)的关系曲线分别如图 4-7 所示。

图 4 不同 S/d_0 条件下,中圈环形通道的 ΔP 和 Re 的关系

从图 4 可以看出,相同 Re 条件下, S/d_0 越大,环形通道的压力降 ΔP 却越小。这是因为 S/d_0 越大,环形通道的 S 就越大,那么流体在环形通道内流动时受到的阻力就越小。

从图 5-7 可以看出,随着 Re 的增大, ξ_{in} 、 ξ_{out} 、 ξ_z 均是逐渐减小,而后趋于一条直线,说明当 Re 达到一定值时, ξ_{in} 、 ξ_{out} 、 ξ_z 不再随 Re 的变化而变化,即与 Re

图 5 不同 S/d_0 条件下,中圈环形通道的 ξ_{in} 和 Re 的关系图 6 不同 S/d_0 条件下,中圈环形通道的 ξ_{out} 和 Re 的关系图 7 不同 S/d_0 条件下,中圈环形通道的 ξ_z 和 Re 的关系

无关。这是因为当 Re 较小时,环形通道内的流体受螺旋管外壁摩擦面的影响,使得壁面处的流动边界层较厚,所以阻力系数相对大一些,而当 Re 增大到一定程度时,即环形通道内的流体速度达到一定值时,流体处于湍流流动状态,流体受螺旋管管外壁摩擦面的影响很小,此时阻力系数不再受速度大小的

影响,而仅和管道的几何尺寸有关,所以这时的阻力系数逐渐趋于一定值。

图 8 描述的是相同 S/d_0 条件下, ΔP 和 Re 的关系。从图中可以看出,相同 Re 条件下,外圈环形通道的压力降大于中圈和内圈环形通道的压力降,而中圈和内圈环形通道的压力降相同。这是因为外圈环形通道的环隙宽度比中圈和内圈环形通道的环隙宽度小,中圈和内圈环形通道的环隙宽度相同,所以流体在外圈通道中流动时受到的摩擦阻力比中圈和内圈通道大,而中圈和内圈环形通道的摩擦阻力相等。

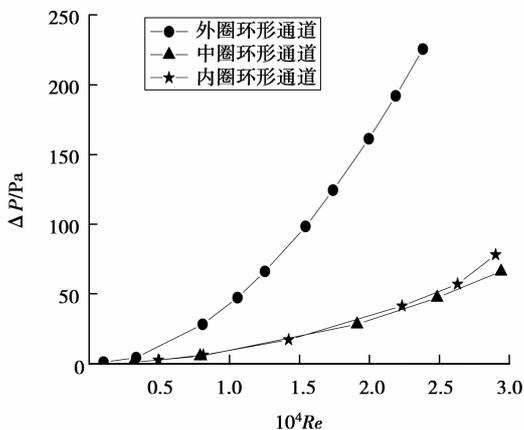


图 8 相同 S/d_0 条件下, ΔP 和 Re 的关系

图 9 描述的是相同 S/d_0 条件下, ξ_z 和 Re 的关系。从图中可以看出,当 $Re < 6000$ 时, ξ_z 随着 Re 的增大而逐渐减小,当 $Re > 6000$, ξ_z 随着 Re 的增大而趋于一条直线。说明当 $Re > 6000$ 时, ξ_z 不再受大小的影响。

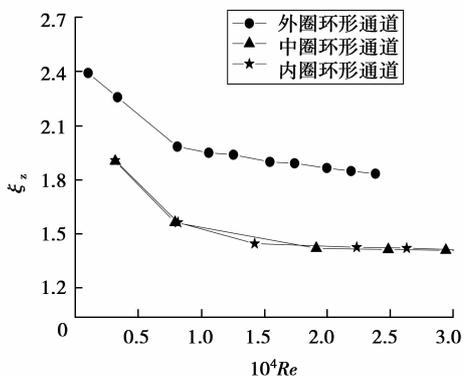


图 9 相同 S/d_0 条件下, ξ_z 和 Re 的关系

图 10 描述的是 $S/d_0 = 2.0$ 时,同轴环形通道进出口阻力系数比较图,从图中可以看出,当流体处于湍流状态时,随着 Re 增加,同轴环形通道的进出口阻力系数曲线逐渐趋于一条直线,这说明当流体速

度达到一定值时,同轴环形通道的进出口阻力系数不再受 Re 的影响。另外,从图中还可以看出,外圈、中圈和内圈环形通道的进口阻力系数相同,而出口阻力系数不同。外圈环形通道的出口阻力系数大于中圈和内圈环形通道的阻力系数,而中圈和内圈环形通道的出口阻力系数相同且 3 圈环形通道的进口阻力系数要比出口阻力系数大。

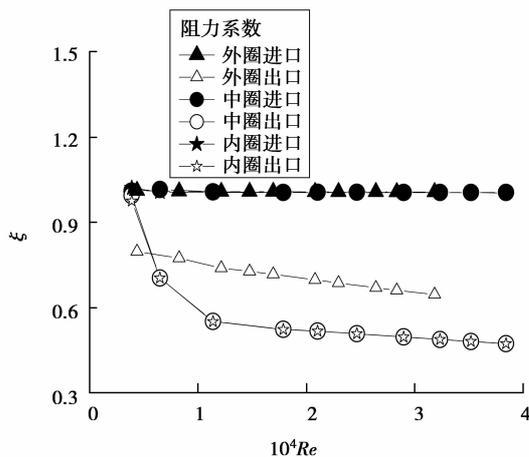


图 10 环形通道的进出口阻力系数比较

对流动阻力系数,将环形通道的实验值与圆形管道的理论值相比较,结果见图 11。从图 11 中可以看出,冷态条件下紊流区内,环形通道的阻力系数的实验结果比圆形管道的理论值大。通过多次重复性实验以减小系统误差,并且测量仪表的不确定度都满足精度要求(压力测量不确定度 0.004%,速度测量不确定度 0.36%)。通过计算可知,环形通道的阻力系数是圆形管道的 1.22~2.75 倍,所以圆形管道的阻力系数计算公式不适用于同轴环形通道的阻力系数计算。即使用同轴环形通道的当量直径代替圆直径也不行。因为利用圆形管道的阻力系数计

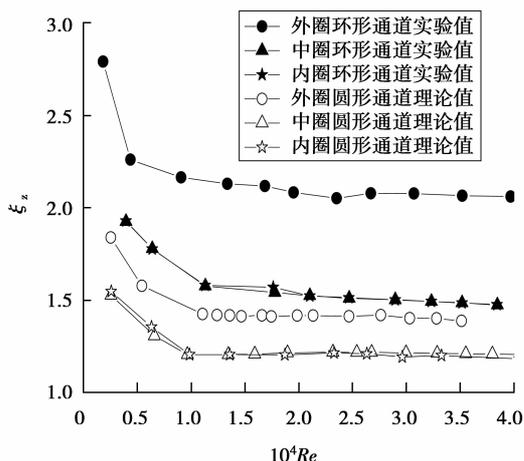


图 11 同轴环形通道实验值和圆形管道理论值比较

算公式计算同轴环形通道的阻力系数会造成22%~175%的误差。

3 结 语

对 $S/d_0=2.0, 2.5$ 和 3.0 同轴环形通道模型进行流动特性的研究。结果表明:相同 Re 条件下, S/d_0 越大, ξ_{in} 、 ξ_{out} 、 ξ_z 都越小; Re 当达到一定值时, ξ_{in} 、 ξ_{out} 、 ξ_z 不再随 Re 的变化而变化, 而是趋于一常数; 相同 S/d_0 和 Re 条件下, 外圈环形通道的压力降大于中圈和内圈环形通的压力降, 而中圈和内圈环形通道的压力降相同。

笔者还将同轴环形通道的实验值和圆形管道(其直径与相应环形通道的当量直径相同)的理论值进行对比, 对比结果表明:冷态条件下紊流区内, 环形通道的阻力系数是普通圆管通道的阻力系数的 $1.22\sim 2.75$ 倍; 圆形管道的阻力系数计算公式不适用于同轴环形通道的阻力系数计算; 利用圆形管道的阻力系数计算公式计算同轴环形通道的阻力系数会造成 $23\%\sim 177\%$ 的误差。

参考文献:

- [1] 江斌, 陈则韶. 盘状螺旋管换热器的实验研究[J]. 低温和超导, 2009, 37(12): 61-64.
JIANG BIN, CHEN ZE-SHAO. Experiment study on the spiral heat exchanger [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2009, 37(12): 61-64.
- [2] 谢公南, 王秋旺, 陶文铨. 环形通道内层流入口段换热及流体变物性的影响[J]. 化工学报, 2005, 56(8): 1403-1408.
XIE GONG-NAN, WANG QIU-WANG, TAO WEN-QUAN. Laminar heat transfer inside concentric annular duct in entrance region and effects of variable fluid properties [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2005, 56(8): 1403-1408.
- [3] 韩志航, 孙奉仲, 韩吉田, 等. 螺旋管换热器的过冷凝结方法研究[J]. 节能, 2004, 24(8): 37-40.
HAN ZHI-HANG, SUN FENG-ZHONG, HAN JI-TIAN, et al. Study on the subcooled condensation of the spiral heat exchanger [J]. Energy Conservation, 2004, 24(8): 37-40.
- [4] KANG S, PATIL B, ZARATE J A, et al. Isothermal and heated turbulent upflow in a vertical channel-part experimental measurements[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(6): 1171-1184.
- [5] ZARATE J A, ROY R P, LAPORTA A. Isothermal and heated turbulent upflow in a vertical channel-part numerical simulations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(6): 1185-1199.

- [6] NOURI J, WHITELAW J. Flow of Newtonian and non-Newtonian fluids in an eccentric annulus with rotation of the inner cylinder[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1997, 18(2): 236-246.
- [7] NOURI J M, UMUR H, WHITLAW J H. Flow of Newtonian and non-Newtonian fluids in concentric and eccentric annuli[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1993, 253: 617-641.
- [8] SREENIVASULU T, PRASAD B. Flow and heat transfer characteristics in an annulus wrapped with a helical wire [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(7): 1377-1391.
- [9] SAYED-AHMED M E, SHARAF-EL-DIN H. Entrance region flow of a power-law fluid in concentric annuli with rotating inner wall [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2006, 33(5): 654-665.
- [10] YAMAGUCHI H, KURIBAYASHI A LTO M, ZHANG X R, et al. An experimented study on the flow characteristics in a three-dimensional cylindrical branching channel [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005, 16(4): 241-249.
- [11] LIU N, LU X. Large eddy simulation of turbulent flows in a rotating concentric annular channel [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2005, 26(3): 378-392.
- [12] 谢公南, 彭波涛, 王秋旺, 等. 管壳式换热器壳侧传热与阻力性能的实验研究与预测[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 104-108.
XIE GONG-NAN, PENG BO-TAO, CHEN QIU-YANG, et al. Experimental study and prediction of pressure drop and heat transfer in shell-side of tube-and-shell heat exchangers [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(21): 104-108.
- [13] 孙立成, 阎昌琪, 孙中宁. 窄环隙内强迫流动阻力特性的实验研究[J]. 核动力工程, 2003, 24(4): 359-362.
SUN LI-CHENG, YAN CHANG-QI, SUN ZHONG-NING. Experimental study on forced water flow resistance in narrow annulus [J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(4): 359-362.
- [14] 孔戴, 彭晓峰, 杨震. 螺旋管紧凑式换热器传热性能分析[J]. 热科学与技术, 2008, 7(2): 115-119.
KONG DAI, PENG XIAO-FENG, YANG ZHEN. Heat transfer behavior of rectangularly coiled pipe heat exchanger [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2008, 7(2): 115-119.