

DOI:10.7652/xjtuxb201408021

矩形截面螺旋通道内的二次流流场特性

马源¹, 曹文瑾², 林梅²

(1. 开封空分集团有限公司, 475002, 河南开封; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了揭示螺旋通道横截面全流场信息, 利用二维粒子图像测速仪(PIV)对高宽比为5:7的矩形截面螺旋通道第二个螺距内的5个横截面流场进行了实验测量, 获得了不同雷诺数下、不同横截面的二次流瞬态流场以及涡量场图像。实验结果表明: 靠近螺旋通道外壁面下角处存在低速区, 并产生了一个顺时针方向的旋涡, 而螺旋通道内壁上角处同样存在低速区并产生了一个旋转方向相反的小旋涡, 内壁上角和外壁下角的正负涡量绝对值较大; 随着螺旋角的上升, 横截面的二次流高速区速度分布由内侧逐步向外侧移动, 使得外侧速度增加, 其截面中心处二次流方向是自下向上流动; 流体旋转一圈半后, 螺旋流动达到稳定状态。此研究结果可为螺旋通道的强化换热设计提供一定的参考。

关键词: 矩形螺旋通道; 粒子图像测速仪; 涡量; 二次流

中图分类号: TQ0211 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)08-0122-06

Secondary Flow Characteristics in Helical Rectangular Channel

MA Yuan¹, CAO Wenjin², LIN Mei²

(1. Kaifeng Air Separation Group Company Limited, Kaifeng, Henan 475002, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The flow fields of 5 cross-sections for the second pitch in a helical rectangular channel with height/width ratio of 5/7 are investigated by two-dimensional particle image velocimetry (PIV), and the secondary flow field and vorticity field for different cross-section are analyzed under different Reynolds numbers. The transient flow characteristics of the channel cross-section are revealed. A low-speed zone exists and a large clockwise vortex is obviously observed at the lower corner of the outer wall near the helical rectangular cross-section, while a low-speed zone also exists and a small counterclockwise vortex is observed at the upper corner of the inner wall. The absolute value of both positive and negative vorticity becomes larger at the upper-corner of the inner wall surface and the lower-corner of outer wall surface. The fluid higher velocity zone gradually moves from the inner to outer region of the helical channel with the increasing helical angle. Moreover, the secondary flow at the cross-section center transmits from the bottom wall to upper wall, and the helical flow tends to be steady after one and a half spiral circles. The results provide reference for enhanced heat transfer design of helical channel.

Keywords: helical rectangular channel; particle image velocimetry; vorticity; secondary flow

螺旋通道在航空、动力、石油和化工等工程设备中有着广泛的应用。由于其独特的结构特性会对在

通道内部流动的流体产生离心力和扭转力, 在这两种力的影响下流体会在垂直于主流流动方向的截面

收稿日期: 2014-03-26。 作者简介: 马源(1969—), 女, 高级工程师; 林梅(通信作者), 女, 高级工程师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51376145)。

网络出版时间: 2014-06-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140623.1126.003.html>

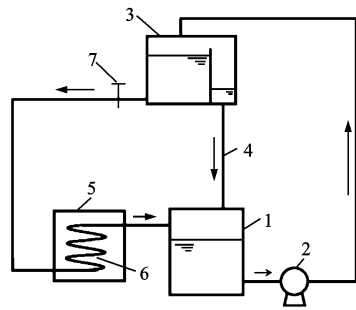
上形成二次流(又称次流),并有可能形成二次涡。这种二次流(或二次涡)能够增加管内流体的扰动程度,加强管内流体的对流作用,从而起到强化传热的效果。目前,针对圆形或半圆形等截面螺旋通道内的流场特性和传热特性已有不少数值模拟和实验方面的研究^[1-8]。文献[9-10]应用摄动法研究了黏性流体在圆形和椭圆形螺旋管内的低频振荡流动,得到了问题的二阶摄动解。文献[11-12]从热力学第二定律出发,采用熵增原理对螺旋管的热力学性能进行了优化。文献[13-14]对正方形截面螺旋通道内层流流场进行了测量,随后对其进行了数值模拟研究。文献[15]对低雷诺数下高宽比为 3.5 的矩形螺旋通道流场进行了实验测量,测量值与数值模拟值吻合较好。对矩形螺旋通道的研究局限于层流流动的作者还有 Eason 等^[16-17]。文献[18]采用剪切应力输运 $k-\omega$ 湍流模型,对矩形螺旋通道进行了湍流流动和传热特性的数值研究,旋转一周后,螺旋管流动进入流动稳定阶段。但是,对矩形截面螺旋通道的整场流动信息同时捕捉的实验研究还未见报道。

粒子图像测速仪(PIV)是目前较为先进的流场测量技术,它克服了空间单点测量(如激光多普勒测速仪、热线热膜测速仪、毕托管、五孔探针等)的技术局限,是一种瞬态、非接触式、全流场的激光测试方法,可以获得平面流场显示的整体结构和瞬态图像。本文利用 PIV 对矩形横截面螺旋通道第二个螺距的 5 个横截面(0° 、 90° 、 180° 、 270° 、 360°)在不同雷诺数下的流场特性进行了实验研究,目的是为了详细地了解螺旋通道横截面二次流流场结构及速度场的变化规律,为螺旋通道的设计和优化提供一定的参考。

1 实验系统和装置

实验回路系统如图 1 所示。低位大水箱中盛有足够量的水,小型水泵从大水箱中将一部分水送入高位水箱。为了保证高位水箱液位恒定,在高位水箱和低位水箱之间连有溢流管,从高位水箱流出的水进入矩形截面螺旋通道试件的入口,自下而上流经试验段后排入低位大水箱中,这样一直循环下去。水的流量调节通过阀门进行控制,流量则采用在出水口称取一定时间段内水的质量获得。为了避免两种介质对光线的折射率不同而造成的光学图像畸变,进而影响到矩形螺旋通道的 PIV 测量结果,采取把螺旋管试件放置于方形玻璃腔中,并且方腔中

充满与试件中流过的介质是同一种液体,这样可以明显地减小光学畸变效应^[19-20]。



1 为低位水箱;2 为泵;3 为高位水箱;4 为溢流管;

5 为玻璃方腔;6 为试验元件;7 为水阀

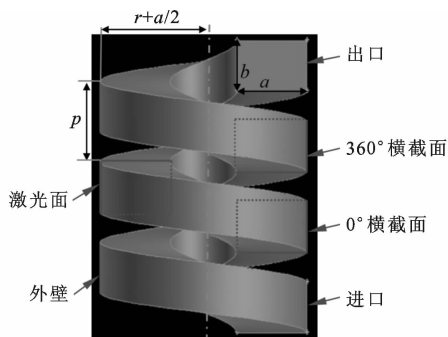
图 1 实验回路系统示意图

实验中采用美国 TSI 公司生产的二维 PIV 测试系统,主要包括激光光源、图像采集系统、同步控制仪和图像数据分析系统等部分。其中激光光源采用 Nd:YAG 双脉冲激光器,脉冲能量为 300 mJ,脉冲频率为 10 Hz,激光片光厚度为 1 mm;型号为 PIVCAM10-30 的电荷耦合器件(CCD)相机用于捕捉图像,其分辨力为 $1\,008 \times 1\,018$ 像素,帧率可达 30 帧/s;图像处理采用厂家提供的 Insight3.0 软件进行互相关统计分析。查询区图像为 32×32 像素,重叠度为 50%。图像的空间分辨力为 $82 \sim 89 \mu\text{m}/\text{像素}$ 。示踪粒子采用反射性较强的碳化硅颗粒,其粒径为 $1.5 \mu\text{m}$ 。

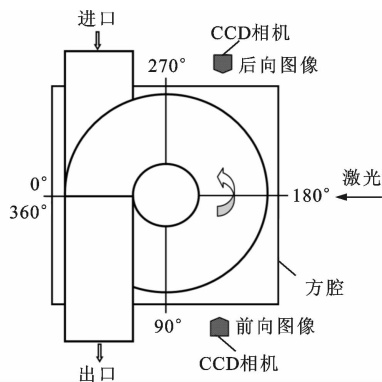
粒子图像测速仪的基本原理是测量流体中所含示踪粒子图像的位移 Δx 、 Δy ,然后根据激光脉冲时间间隔 Δt ,计算得到流体的近似速度。为了得到粒子群的位移信息,数据处理采用互相关算法,即对所拍摄到的粒子图像进行 3 次二维快速傅里叶变换。

为了便于流场拍摄,矩形螺旋流道由有机玻璃制成,其表面粗糙度约为 0.01 mm。测量截面定义如下:实验流道的进口段末端,即螺旋通道入口截面称作第一个螺距的 0° 截面,如图 2 所示,其余截面按相对于 0° 截面沿螺旋线旋转角度命名,图 2b 中显示了俯视时的截面位置。由于螺旋通道的部分支撑结构的遮挡,并不是所有截面都能够拍摄到,因此本次实验的主要测量截面设置为第二个螺距的 0° 、 90° 、 180° 、 270° 和 360° 共 5 个截面。

CCD 相机垂直于被测截面,即垂直于激光照亮截面而布置。由于图 2a 为螺旋通道三维结构正视图,所以 CCD 相机位置无法在图中表示。此外,定义 CCD 相机镜头方向与流道内主流方向相同时得到的图像称为前向图像,拍摄到的粒子图像如图 3a

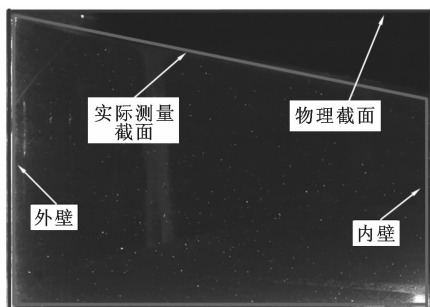


(a) 三维图

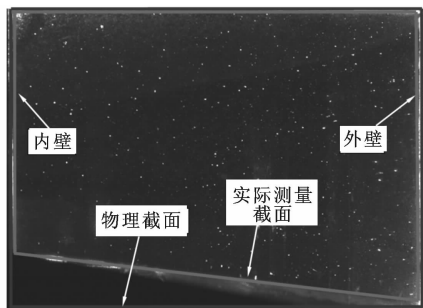


(b) 俯视图

图2 矩形螺旋通道



(a) 前向



(b) 后向

图3 前、后向粒子图像

所示,方框部分为实际截面。但是,由于管道扭曲,横截面的上半部被试件上壁面遮挡住一部分(图2a所示),因为扭曲壁面的透光性不好,所以相机能够识别的粒子图像视场比实际截面小,图3a中的梯形

为能够识别的PIV粒子图像截面,图像左侧为螺旋通道外侧(即梯形长边)。同理,CCD相机镜头方向与流道内主流方向相反时得到的图像(如图2b所示)称之为后向图像,拍摄到的粒子图像如图3b所示,梯形长边(图像右侧)为螺旋通道外侧。

矩形横截面螺旋通道的几何结构参数如图2a所示。试验段共有3个螺距,单个螺距 $p=80\text{ mm}$,截面尺寸 $a\times b$ 为 $70\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,螺旋半径 $r=68\text{ mm}$ 。无量纲参数曲率(δ)、挠率(τ)、雷诺数(Re)定义如下

$$\delta = \frac{a}{r} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{p}{2\pi r} \quad (2)$$

$$Re = \frac{2\rho uab}{(a+b)\eta} \quad (3)$$

式中: ρ 为流体的密度; u 为流体的平均速度; a 、 b 分别为矩形截面的宽和高, η 为流体的黏度。本实验试件的曲率 $\delta=1.03$,挠率 $\tau=0.187$ 。

2 实验结果及分析

2.1 螺旋通道不同截面的瞬态速度场分析

本文实验主要展示入口雷诺数 Re 为2 000和4 000时,第二个螺距的5个横截面(0° 、 90° 、 180° 、 270° 和 360°)的流场结果。

图4、图5所示为5个横截面在不同雷诺数下的瞬态矢量流场。在 $Re=2\ 000$ 时,从 $0^\circ\sim 360^\circ$ 横截面矢量流场-速度云图中可见:螺旋通道外侧下角存在低速区,而内侧壁面的低速区不明显,仅在 90° 、 270° 和 360° 这3个横截面中观察到内壁低速区。螺旋通道的流动不同于直管道内的流动,流速最大区域并不是在通道截面中心处。这是因为螺旋通道的扭曲形成的离心力使得中心流体在横截面切向方向产生了速度分量,从而造成中心流体与边壁流体的动量差,使流体流动发生偏离,流向外壁。此外,随着螺旋角的上升,在离心力和扭转力的共同作用下,流体向外侧区域运动,使得外侧的高速区域增加。同样的结论在高雷诺数下也可以得到。从图5中可见,在 $Re=4\ 000$ 时, 0° 横截面外侧区域的高速区域分布不大, 90° 横截面外侧高速区范围逐步在扩大,而 180° 和 270° 两个横截面中外侧高速区域特别明显。图6所示的局部速度矢量分布为图4中的 0° 横截面内壁上角和外壁下角处在 $Re=2\ 000$ 时局部放大流场。从图中可见,在内侧区域上角和外侧区域下角处存在一对旋转方向相反的旋涡。由于壁面

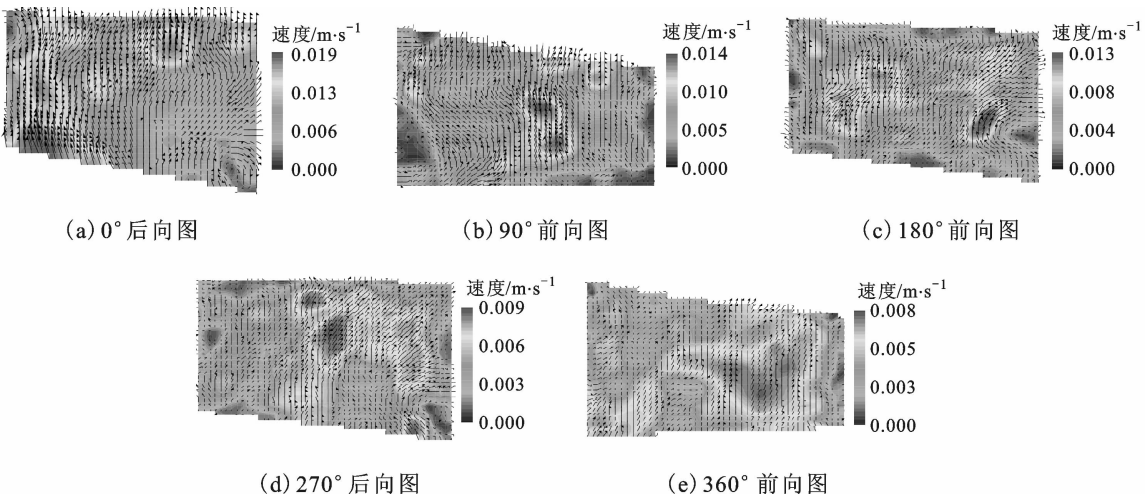


图 4 $Re=2\ 000$ 时瞬态速度矢量场(梯形长边为外壁)

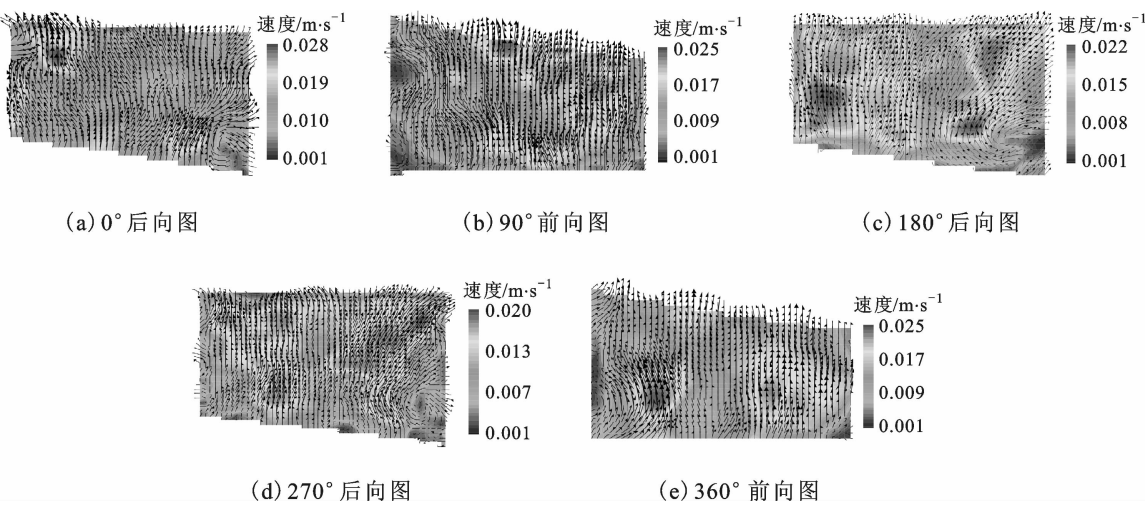


图 5 $Re=4\ 000$ 时瞬态速度矢量场(梯形长边为外壁)

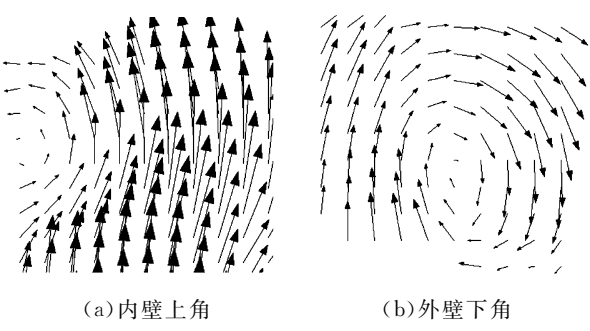


图 6 0° 横截面内壁上角和外壁下角处局部速度矢量场($Re=2\ 000$)

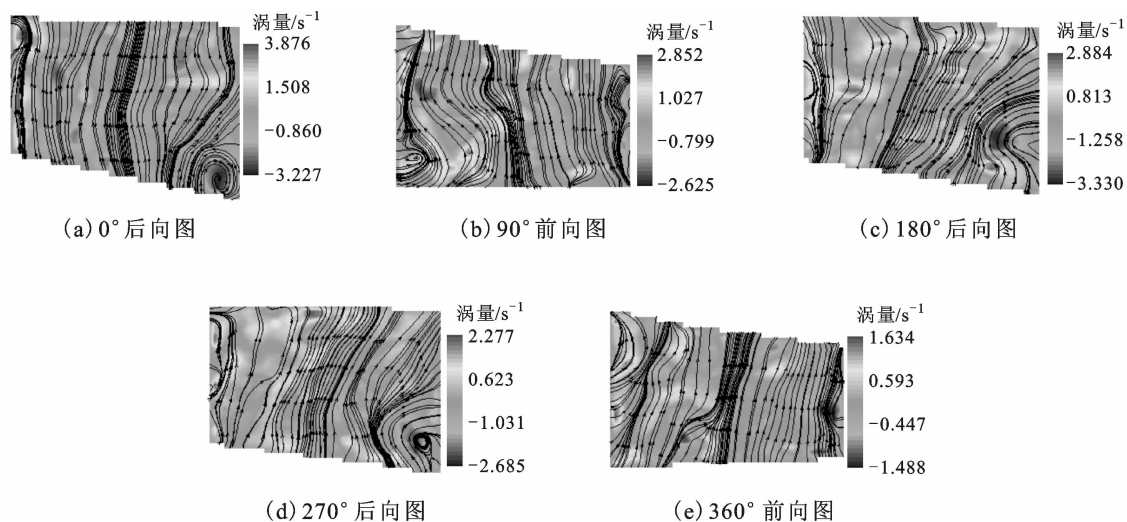
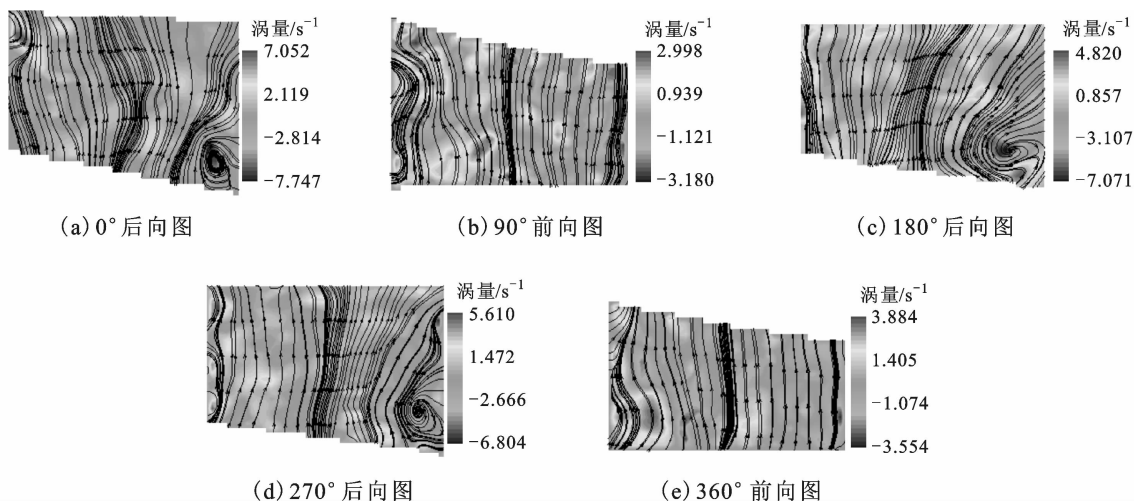
反光的影响,无法拍摄到近壁的图像,所以内侧区上角处的旋涡不是很完整。

图 4、图 5 中另一个流动特征是:矩形截面中间流体的二次流方向并不是由内壁沿水平方向流向外壁,而是自下向上流动。其主要原因是由于矩形截

面螺旋通道的曲率较大(曲率 $\delta=1.03$),造成通道扭曲产生的向上扭转力很大所致。

2.2 螺旋通道不同截面涡量场分析

图 7、图 8 所示为不同雷诺数下基于该流场得到的流线-涡量云图。在描述旋涡方向时,以反向图像的方向进行二次流旋涡的方向描述,对于正向图像得到的涡量图应该反向观察。从 $0^\circ\sim360^\circ$ 横截面流线-涡量云图中可以观察到:在 90° 和 360° 两个横截面中(其他 3 个横截面由于管道扭曲造成的阻挡,拍摄不到横截面底面的流场),外侧底部区流体斜着流向横截面中间,然后转向向上、向外运动,碰到外壁面后,速度减小到 0,然后转向向下流动,从而在外侧底部就形成二次流旋涡;在 0° 、 180° 和 270° 这 3 个横截面能够明显地观察到顺时针旋涡(涡量为负),而 90° 和 360° 两个横截面的旋涡不明显,但是其涡量绝对值比较大。内侧底部区流体先

图7 $Re=2\ 000$ 时的流线-涡量云图(梯形长边为外壁)图8 $Re=4\ 000$ 时的流线-涡量云图(梯形长边为外壁)

向外运动到中间时,与外侧流体一同转向向上壁面运动,碰到上壁面后,速度减小为0,然后转向内壁运动,所以在内壁面顶部位置有旋涡出现,0°横截面内壁顶部旋涡较为明显。尽管在其他横截面内壁顶部没有观察到明显的旋涡,但是其正涡量值较大。随着雷诺数的增加,各截面的涡量值在增加。以图7中270°横截面为例,在 $Re=2\ 000$ 时,其涡量绝对值最大约为 2.7 s^{-1} ,而图8中在 $Re=4\ 000$ 时,其涡量绝对值最大约为 6.8 s^{-1} 。

3 结 论

本文利用粒子图像测速仪对高宽比为5:7的矩形螺旋通道第二个通道中5个横截面(0°、90°、180°、270°、360°)的流场进行了实验研究,获得了截面在过渡区雷诺数下的二次流瞬态流场和涡量场。

主要研究结果表明:对于曲率较大的螺旋通道,其截面中心流体的二次流方向自下向上流动,在螺旋通道外侧下角存在低速区,并在此处形成二次流顺时针旋涡,而内侧壁面上角处会产生一个旋转方向相反的小旋涡,尽管在某些截面旋涡不明显,但是其顶部的涡量绝对值较大;随着螺旋角的上升,横截面二次流高速区速度分布由内侧区域转向外侧区域,使得外侧流体速度增加;在第二个螺旋通道的180°横截面以后,横截面二次流速度场具有相似的特点,即流体经过一圈半旋转后达到流动稳定状态。因此,在对螺旋通道进行强化换热设计和优化时,应充分考虑到其流动特征。

参考文献:

- [1] YU B, ZHENG B, LIN C X, et al. Laser Doppler

- anemometry measurements of laminar flow in helical pipes [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2003, 27: 860-865.
- [2] YANG G, DONG Z F, EBADIAN M A. Laminar forced convection in a helicoidal pipe with finite pitch [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1995, 38(5): 853-862.
- [3] XIN R C, AWWAD A, DONG Z F, et al. An experimental study of single-phase and two-phase flow pressure drop in annular helicoidal pipes [J]. *Int J Heat and Fluid Flow*, 1997, 18(5): 482-488.
- [4] LIN C X, EBADIAN M A. The effects of inlet turbulence on the development of fluid flow and heat transfer in a helically coiled pipe [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1999, 42(4): 739-751.
- [5] 张金锁, 章本照. 环形截面螺旋管道内二次流动特性的研究 [J]. *力学学报*, 2001, 33(2): 183-194.
ZHANG Jinsuo, ZHANG Benzhuo. The research on the characteristics of the secondary flow in a helical annular pipe [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2001, 33(2): 183-194.
- [6] PIZZA I D, CIOFALO M. Numerical prediction of turbulent flow and heat transfer in helical coiled pipes [J]. *Int J Thermal Sciences*, 2010, 49: 653-663.
- [7] MOAWED M. Experimental study of forced convection from helical coiled tubes with different parameters [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(2): 1150-1156.
- [8] 付衍琛, 邓宏武, 吕品, 等. 螺旋管内超临界航空煤油流动阻力特性 [J]. *航空动力学报*, 2013, 28(3): 688-694.
FU Yanchen, DENG Hongwu, LÜ Pin, et al. Flow resistance characteristics of supercritical aviation kerosene in helix tube [J]. *J Aerospace Power*, 2013, 28(3): 688-694.
- [9] 章本照, 马寨璞, 苏霄燕, 等. 圆截面螺旋管道内非定常流动研究 [J]. *应用数学和力学*, 2003, 24(5): 519-528.
ZHANG Benzhuo, MA Zaipu, SU Xiaoyan, et al. A study on the unsteady flow in helical pipe [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2003, 24(5): 519-528.
- [10] 章本照, 张金锁, 常华章, 等. 椭圆形截面螺旋管道内二次流动的摄动解 [J]. *空气动力学报*, 2000, 18(4): 448-455.
ZHANG Benzhuo, ZHANG Jinsuo, CHANG Huazhang, et al. Perturbation solution of secondary flow in helical elliptical pipe [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2000, 18(4): 448-455.
- [11] KO T H, KING T. Entropy generation and thermodynamic optimization of fully developed laminar convection in a helical coil [J]. *Int Com Heat Mass Transfer*, 2005, 32(1/2): 214-223.
- [12] KO T H. Thermodynamic analysis of optimal mass flow rate for fully developed laminar convection in a helical coiled tube based on minimal entropy generation principle [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(18/19): 3094-3104.
- [13] BOLINDER C J, SUNDEN B. Flow visualization and LDV measurements of laminar flow in a helical square duct with finite pitch [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1995, 11: 348-363.
- [14] BOLINDER C J, SUNDEN B. Numerical prediction of laminar flow and forced convective heat transfer in a helical square duct with a finite pitch [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1996, 39(15): 3101-3115.
- [15] 张丽, 邢彦伟, 吴剑华. 矩形截面螺旋通道内流体的流动特性 [J]. *化工学报*, 2010, 61(5): 1089-1096.
ZHANG Li, XING Yanwei, WU Jianhua. Flow characteristics in helical duct with rectangular cross section [J]. *J Chemical Industry and Engineering*, 2010, 61(5): 1089-1096.
- [16] EASON R M, BAYAZITOGLU Y, MIADÉ A. Enhancement of heat transfer in square helical ducts [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1994, 37(14): 2077-2087.
- [17] CHEN H J, ZHANG B Z, ZHANG J S. Fluid flow in rotating helical squared ducts [J]. *J Hydrodynamics*, 2003, 15(3): 49-56.
- [18] 邢云绯, 仲峰泉, 张新宇. 矩形横截面螺旋管湍流流动与传热特性的数值研究 [J]. *航空学报*, 2013, 34(6): 1269-1276.
XING Yunfei, ZHONG Fengquan, ZHANG Xinyu. Numerical prediction of turbulent flow and heat transfer characteristics in helical rectangular ducts [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(6): 1269-1276.
- [19] HOUT R V, GULITSKI A, BARNEA D, et al. Experimental investigation of the velocity field induced by a Taylor bubble rising in stagnant water [J]. *Int J of Multiphase Flow*, 2002, 28(4): 579-596.
- [20] WERELEY S T, LUEPTOW R M. Velocity field for Taylor-Couette flow with an axial flow [J]. *Phys Fluids*, 1999, 11(12): 3637-3649.

(编辑 杜秀杰)