

研究论文

三角形螺旋流道充分发展层流流体的 流动性能

王翠华^{1,2}, 刘胜举², 吴剑华^{1,2}, 李雅侠²

(¹天津大学化工学院, 天津 300072; ²沈阳化工大学能源与动力工程学院, 辽宁 沈阳 110142)

摘要: 基于角钢螺旋夹套, 展开了对三角形螺旋流道层流流动性能的实验和数值研究。经对比, 同一模型下的实验结果和模拟结果吻合良好。采用数值方法得到了充分发展状态下流体的主流速度、二次流速度、流函数及涡量的分布特点, 分析了三角形边界上局部阻力系数的分布规律, 并与半圆管螺旋流道进行了比较。结果表明: 在所研究的 Dean 数及量纲 1 曲率(κ)内, 流道横截面上的二次流为稳定的两涡结构, 内、外壁面局部阻力系数的分布明显不同, 外壁面局部阻力系数的平均值约为内壁面阻力系数平均值的 1.54~2.72 倍; 随着 Dean 数及 κ 的增大, 二次流动增强, 内、外壁面阻力系数均增大; 对于量纲 1 挠率及 Dean 数均较小的三角形螺旋流道, 挠率对流体流动的影响很小; 通过对比, 两种流道具有相同内壁面面积、曲率半径、螺距及 Reynolds 数时, 三角形螺旋流道的流动阻力小于半圆管螺旋流道。

关键词: 螺旋流道; 三角形截面; 流动; 模拟; 实验验证

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.01.013

中图分类号: TQ 021.1

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2014) 01—0100—08

Characteristics of fully developed laminar flow in triangular helical duct

WANG Cuihua^{1,2}, LIU Shengju², WU Jianhua^{1,2}, LI Yaxia²

(¹School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²School of Energy and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, Liaoning, China)

Abstract: Based on jackets with triangular flow channels, laminar flow characteristics in triangular helical duct were investigated experimentally and numerically. The simulation results were in good agreement with experimental values. Then the main flow velocity, secondary flow, stream function and vorticity were obtained with numerical method. The distribution of local frictional factor on the boundary of the triangular helical duct was analyzed and compared with that of half-coil helical duct. The results show that the structure of secondary flow is steady two vortices in the range of Dean number and dimensionless curvature ratio. The distribution of local frictional factor along the outer walls differs obviously from that along the inner wall. The mean value of the local frictional factors at the outer walls is 1.54—2.72 times that at the inner wall. With the increase of Dean number and dimensionless curvature ratio, the secondary flow is enhanced and the frictional factors on the outer walls and inner wall increase. For triangular helical ducts with small dimensionless torsion and Dean number, the torsion has little effect on the flow resistance. Compared with the semicircle helical duct with the same area of inner wall, curvature radius, pitch and Reynolds number, the flow resistance in the triangular helical duct is

2013-03-15 收到初稿, 2013-08-28 收到修改稿。

联系人: 吴剑华。第一作者: 王翠华 (1978—), 女, 博士研究生, 讲师。

基金项目: 中央支持地方高校发展专项资金项目 (辽财指教 [2010] 865 号)。

Received date: 2013-03-15.

Corresponding author: Prof. WU Jianhua, wch-7855@163.com

Foundation item: supported by Special Program for Local Universities Development of Central Finance of China.

smaller.

Key words: helical duct; triangular cross section; flow; simulation; experimental validation

引 言

螺旋流道内流体的流动和换热是工业、流体力学和传热领域中的重要问题, 引起了人们广泛的关注。三角形螺旋流道属于螺旋流道中的一种, 其横截面形状为三角形, 在化工、能源等行业的典型应用有釜外角钢螺旋夹套。所谓角钢螺旋夹套, 是将角钢螺旋缠绕焊接在筒体状容器的外侧, 角钢与筒体外壁构成横截面为等腰直角三角形的螺旋流道, 流道内通入加热或冷却介质, 可加热或冷却容器内的物料^[1-2]。基于此工程实际应用, 本文开展了对该三角形螺旋流道的研究。

查阅大量文献发现, 前人对螺旋流道流体流动和强化传热的研究主要采用数值分析和实验研究方法, 得出很多重要的结论, 为开展三角形螺旋流道的研究指明了方向并提供了指导性方法。如 Wang^[3] 和 Geramo^[4] 分别导出了用于螺旋流道内流体流动的非正交和正交方程, 使得螺旋流道内流体的流动及传热研究取得了突破性进展; Yamamoto 等^[5-8]、Futagami 等^[9]、Gong 等^[10]、Janssen 等^[11] 和 Liu 等^[12] 分别对圆形截面螺旋管道内流体流动及换热性能进行了研究, 揭示了二次流对管内流体换热的强化作用, 分析了结构参数对圆形截面螺旋流道内流体流动及换热的影响; Bolinder^[13-15]、Sakalis 等^[16]、Chen 等^[17] 和张丽等^[18] 分别采用数值方法或实验的方法研究了截面形状为矩形的螺旋流道, 总结出了量纲 1 螺距、曲率、截面高宽比、普朗特数等对管道流动及换热性能的影响。

目前关于三角形螺旋流道流体流动和换热性能的研究文献较少。王翠华等^[19] 采用 CFD 软件对该三角形螺旋流道内层流流体的流动性能进行了数值模拟, 分析了小曲率 (量纲 1 曲率 $\kappa < 0.08$) 时层流流体流动的阻力性能, 但文章中并没有给出实验验证, 也未分析三角形截面各边界处局部阻力系数的分布特点。鉴于此, 本文对该三角形螺旋流道的速度场进行了实验测量, 将其与数值模拟的结果进行比较, 给出了该三角形螺旋流道边界局部阻力系数的分布特点, 并与半圆管螺旋流道进行了比较, 这不仅填补了三角形螺旋流道流体流动实验研究的空白, 同时也为角钢螺旋夹套的结构设计、流体流动换热性能优化及工程推广应用提供重要的理

论依据。

1 物理模型及坐标系统

该三角形螺旋流道的物理模型及坐标系统如图 1 所示。其中, R_c 为螺旋流道的曲率半径, H 为螺距, a 为直角三角形斜边的边长。(r, θ, z) 为螺旋流道所在的柱坐标系, 其速度分量分别用 v_r, v_θ, v_z 来表示。(x, y, s) 为正交螺旋坐标系, 其速度分量分别为 u, v, w 。根据柱坐标系和正交螺旋坐标系的关系^[15, 20], u, v, w 可用 v_r, v_θ, v_z 来表示为

$$w = -\sin\varphi\cos\alpha v_r + \cos\varphi\cos\alpha v_\theta + \sin\alpha v_z \quad (1)$$

$$u = -\cos\varphi v_r - \sin\varphi v_\theta \quad (2)$$

$$v = \sin\varphi\sin\alpha v_r - \cos\varphi\sin\alpha v_\theta + \cos\alpha v_z \quad (3)$$

$$\sin\varphi = \frac{K(z-z_0)}{K^2 + R_c^2}, \quad \sin\alpha = K/\sqrt{R_c^2 + K^2},$$

$$\cos\alpha = R_c/\sqrt{R_c^2 + K^2} \quad (4)$$

式中 $K = H/2\pi$ 为绕螺旋线单位弧度时 z 方向的上升高度, α 为螺旋线升角, φ 为沿螺旋流道中心线的极角, z_0 为横截面斜边中点的 z 坐标值。

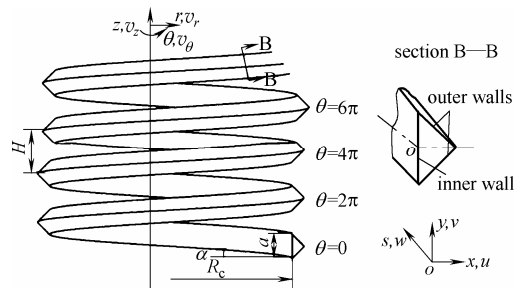


图 1 物理模型和坐标系统

Fig.1 Physical model and coordinate systems

将各变量量纲 1 化

$$x' = x/d_h, \quad y' = y/d_h, \quad w' = w/w_m, \quad (u', v') = (u, v)\rho d_h / \mu \quad (5)$$

引入以下量纲 1 参数 (曲率、挠率、Reynolds 数 Re 、Dean 数 Dn 、流函数 ψ 、涡量 ω)

$$\kappa = R_c d_h / (R_c^2 + K^2), \quad \tau = K d_h / (R_c^2 + K^2),$$

$$Re = d_h w_m \rho / \mu, \quad Dn = Re \sqrt{\kappa} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y'} = (1 - \kappa x')u' + \tau Re y' w', \quad \frac{\partial \psi}{\partial x'} = -(1 - \kappa x')v' + \tau Re x' w' \quad (7)$$

$$\omega = \partial v' / \partial x' - \partial u' / \partial y' \quad (8)$$

边界的局部阻力系数 fRe_{local} 和平均阻力系数 fRe_m 定义为

$$fRe_{\text{local}} = \frac{2\delta_{w,\text{local}}}{\mu w_m/d_h} \quad (9)$$

$$fRe_m = -\frac{\partial p / \partial s}{2\mu w_m/d_h^2} \quad (10)$$

其中, $d_h = a/(\sqrt{2}+1)$ 为直角三角形截面的当量直径, w_m 为流道横截面上的平均速度, μ 为流体的动力黏度, $\delta_{w,\text{local}} = \mu \frac{\partial w_{\text{local}}}{\partial n}$ [21] 为壁面的局部切应力, $\partial w_{\text{local}} / \partial n$ 为沿壁面法线方向的局部 s 向速度梯度, $\partial p / \partial s$ 为沿 s 方向的压降梯度。

2 实验测量系统与数值模拟

2.1 实验测量系统与误差分析

该三角形螺旋流道流场实验测量系统是由高、低位储液槽, 泵, 流量计, 三角形螺旋流道组件等构成, 其实验流程图如图 2 所示。通过车床对壁厚为 20 mm 的有机玻璃管 I 内壁加工成截面为等腰直角三角形的螺旋槽道, 精加工后的管内径与加工后的有机玻璃棒材 II 外径经过配合形成实验用三角形螺旋流道, 流道入口和出口均采用切向导管和连接管道相连。三角形螺旋流道的具体尺寸为: 螺旋半径 $R_c=77.5$ mm, 等腰直角三角形斜边 $a=34$ mm, 螺距 $H=44$ mm, 共 5.5 圈。螺旋流道组件放置在有机玻璃槽 III 内, 槽内充满水作为补偿介质, 使光线从空气中垂直射入水槽壁面, 再射入流道的圆弧壁面。由于水的折射率与有机玻璃相近, 从而大大减小了由折射引起的测量误差 [22]。有机玻璃槽 III 的壁厚为 5 mm, 槽内壁距有机玻璃管 I 外壁面的距离为 20 mm。为恒定高位储液槽的液位, 在高、低位槽间连有溢流管。实验工质采用水, 水温控制在 19~21℃ 之间时进行实验。由于该温度范围内水的物性参数变化不大, 故按平均温度 20℃ 时水的物性参数进行取值。水的流量采用流量计 5 测量, 流量的校正采用文献 [18] 的方法, 即多次取出一定时间间隔内的流体, 量取体积后取平均值, 除以时间间隔算出流量, 以此校正流量计。采用丹麦 DANTEC 公司生产的三维五光束激光多普勒测速仪 (LDV) 测量水的速度, 水中加入密度与水相近的空心玻璃球作为示踪粒子, 其主要成分为二氧化硅, 粒径为 8~12 μm。

如文献 [18] 所述, 实验测量过程中存在着固定误差和随机误差。实验系统的固定误差与流量测量、信号处理系统以及装置安装的精度有关。因为激光多普勒测速仪是一种非接触式测量技术, 测量精度

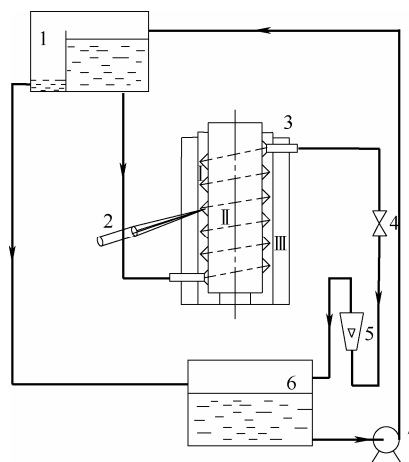


图 2 实验系统流程

Fig.2 Sketch of experimental system

1—upper reservoir; 2—LDV probe; 3—triangular helical duct;
4—valve; 5—flow meter; 6—lower reservoir; 7—pump

较高, 而且信号处理系统 BSA60 可实现对信号的高精度分析, 实验装置经专业安装调试后, 由以上部分产生的固定误差小于 1%。其次, 光通过流动介质时会产生折射, 致使测量点的定位存在偏差, 造成测量的固定误差。这可以通过将坐标架移动距离乘以一个系数进行校正, 由于本实验中坐标架移动的距离较小, 由此产生的测量点位置的最大偏差约为 1%。随机误差可由所测得的多样本数据进行估算, 本文流体流动为稳态层流流动状态, 每个测量点的速度波动不大, 各方向速度的随机误差远远小于 1%。

2.2 数值模拟

本文应用流体动力学软件, 以水作为工作介质, 采用层流稳态模型, 均匀流速入口, 充分发展出口。计算网格采用非结构六面体网格 (网格划分见图 3), 通过网格独立性实验, 确定面网格间距为 0.4 mm, 体网格间距为 1 mm。压力和速度的解耦

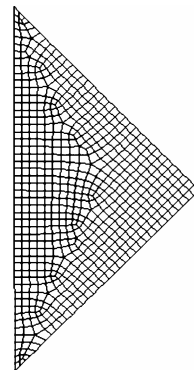


图 3 横截面上的网格划分

Fig.3 Grid of cross section

计算采用 SIMPLEC 算法, 对流项的离散格式采用二阶迎风格式, 收敛残差均取小于 1.0×10^{-5} 。

2.3 实验结果与模拟结果对比分析

文献[19]中指出, 流体在等腰直角三角形螺旋流道内流动时, 从入口经过不到 1 圈就已达到充分发展流动状态。但这是采用数值模拟方法得出的结论, 并没有通过实验证实。本文采用 LDV 对流道的三个截面($\theta=4\pi$ 、 6π 和 8π)进行了柱坐标系下三维速度的测量, 并将三截面中心线上 v_θ 沿 x' 的分布示于图 4。从图中可见, 三截面中心线上各点的 v_θ 值较一致, 实验证明在 $\theta=4\pi$ 的截面处流场已处于充分发展状态。为保证得到充分发展状态下流体的流场且避免端口效应对流体流动的影响, 本文取 $\theta=6\pi$ 截面上 $Re=337$ 和 674 的三维柱坐标速度与相应的模拟结果进行比较, 并将比较结果示于图 5 中。图中显示, 实验结果和模拟结果比较一致。由于试件加工出螺旋槽道后, 其两外壁面(outer walls in Fig. 1)需要抛光处理, LDV 的光束才能透过螺旋槽道外表面, 测量流道内流体的速度。试件在加工过程中会有加工误差, 且存在外壁面抛光精度不一致的现象, 因此 LDV 光束到各测量点的折射并不相同; 实验过程中各测量点水的速度会产生轻微不规则的波动, 这都会使得实验结果相对于模拟结果存在一定波动。另外实验测量过程中还存在其他前文中所述的误差, 致使实验值和模拟值并不能完全重合, 存在一定偏差。结果表明: v_θ 吻合最好, 其平均误差仅为 5.24%, v_z 的平均误差为 8.82%。由于 v_x 的数值较小, 其偏差最大, 平均误差为 11.56%。以上偏差仍在误差估计的范围内, 表明实验和数值模拟方法可靠。

3 模拟结果分析

本文模拟计算了 $56 \leq Dn \leq 635$, $0.02 \leq \kappa \leq 0.2$,

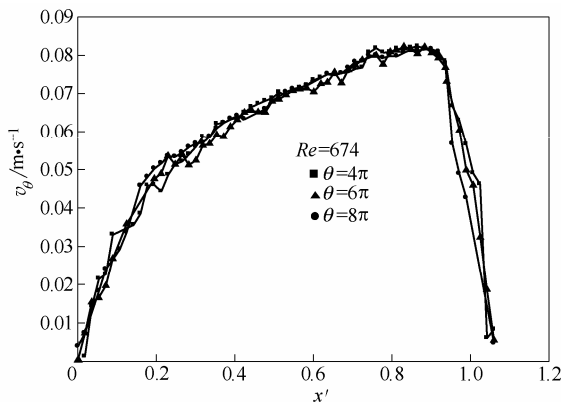


图 4 截面中心线上 v_θ 的分布

Fig. 4 Distribution of v_θ at centerline of cross section

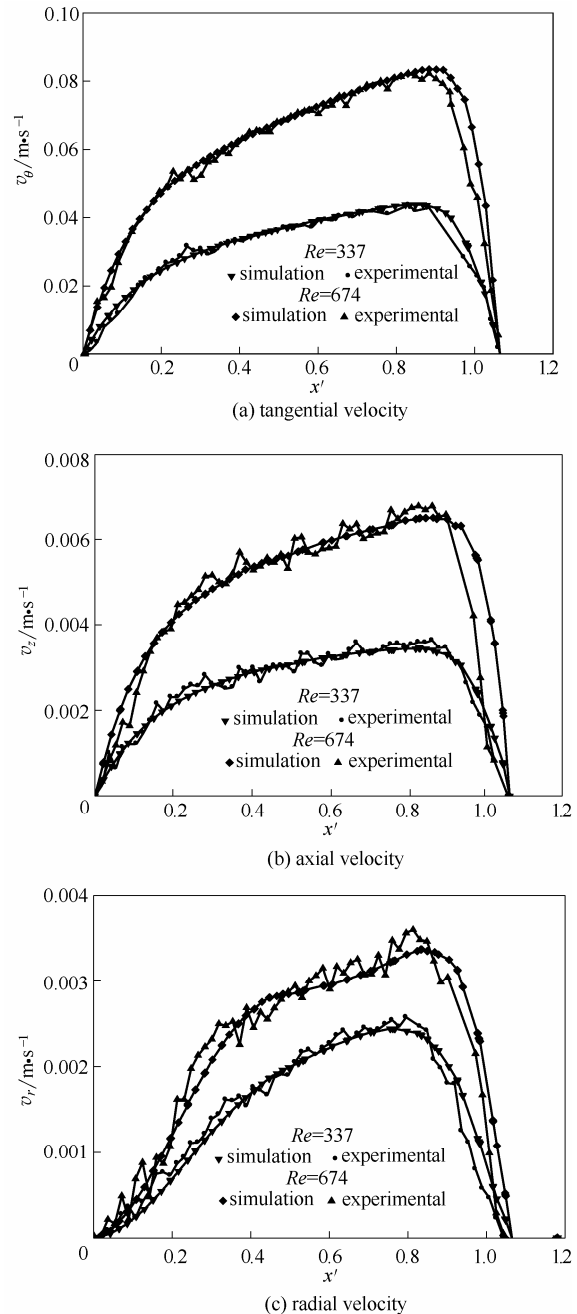
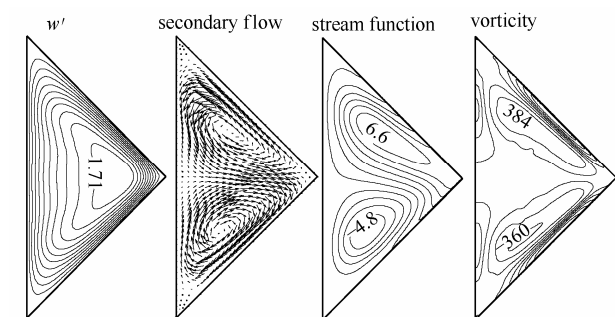


图 5 三维柱坐标速度的实验结果与模拟结果

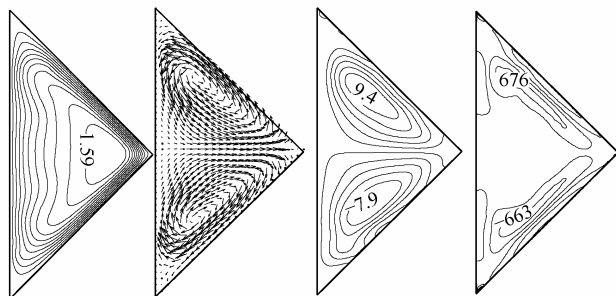
Fig. 5 Experimental and simulated three-dimensional velocities of cylindrical coordinate

$0 \leq \tau \leq 0.02$ 范围内的不同模型, 截取不同 Dn 时 $\theta=6\pi$ 面上流体柱坐标系下的三维速度及相应的坐标值, 按式(1)~式(8)进行变换, 得到相应横截面上的流场分布, 示于图 6。由图中可见, 层流流体在该三角形螺旋流道内流动时, 由于离心力的作用, 量纲 1 速度 w' 的最大值向外壁面偏移, 致使两外直角壁侧的 w' 等值线密集, 其速度梯度远大于内壁侧。横截面上的二次流为旋转方向相反且稳定的两涡结

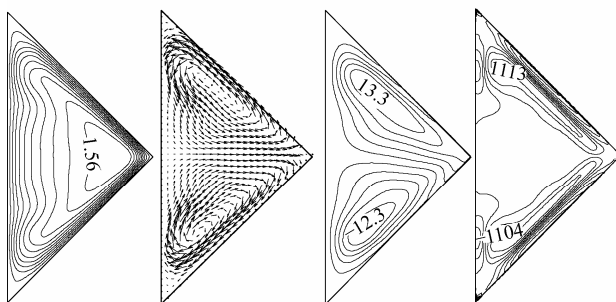
构。随着 Dn 的增大, 流体受离心力的作用增加, w' 最大值愈向外壁面偏移, 二次涡沿外壁面方向被拉长, 且涡中心的位置更加靠近外壁面, 两涡中心处最大二次流流函数及涡量数值增大, 说明随着 Dn 的增加, 二次流动增强。



(a) $Dn=89$, $\kappa=0.2$, $Re=200$



(b) $Dn=169$, $\kappa=0.02$, $Re=1200$



(c) $Dn=254$, $\kappa=0.1$, $Re=800$

图 6 Dn 不同时的流场分布

Fig. 6 Flow field at different Dn

图 7 给出了不同 Dn 时内、外壁面局部阻力系数沿 y' 的分布。从图中可以看出, 内壁面上的局部阻力系数基本关于 $y'=0$ 点对称, 受上、下二次涡的影响, 在接近上、下二次涡中心位置的内壁面处出现内壁面 fRe_{local} 的峰值。上、下两外壁面局部阻力系数关于 $y'=0$ 中线基本对称, 但 fRe_{local} 随 y' 变化的曲线形状与内壁面的大不相同。90°顶角处的 fRe_{local} 较小, 在所研究范围内, 约为外壁面 fRe_{local} 峰值的

22.7%~37.7%。受离心力及外壁面结构的影响, 紧靠 90°顶角两侧的外壁面处出现外壁面 fRe_{local} 的最大值。

同一 Dn 下, 除了邻近 $y'=0$ 和 $y'=\pm 1.207$ 的边界外, 当二者具有相同 y' 值时, 外壁面的 fRe_{local} 远大于内壁面上的 fRe_{local} 。经计算得出: 在所研究的范围内, 流道外壁面 fRe_{local} 的平均值约为内壁面 fRe_{local} 平均值的 1.54~2.72 倍。结合流场分布图(图 6)可知, 由于离心力的作用, 外壁面处主流速度梯度远远大于内壁面处的主流速度梯度, 使得外壁面处的流体剪切力较大, 因此外壁面的流体阻力系数明显大于内壁面的流体阻力系数。

从图 7 还可以看出, 对于给定的曲率($\kappa=0.1$), Dn 较大时内、外壁面 fRe_{local} 均大于 Dn 较小时的内、外壁面的 fRe_{local} , 因此其平均阻力系数 fRe_m 也会随 Dn 的增加而增大, 且 fRe_m 增大的幅度会随 Dn 的增加而减小, 此结果可以从图 8 给出的平均阻力系数与 Dn 的关系中看出。对比图 7 和图 8 中 $\kappa=0.02$ 、 $Dn=283$ 和 $\kappa=0.1$ 、 $Dn=254$ 的模拟结果可以看出, 尽管 $\kappa=0.02$ 的模型 Dn 稍大, 但由于曲率 κ 小, 其内、外壁局部阻力系数及平均阻力系数均比 $\kappa=0.1$ 的低, 这表明当 Dn 相同时, 曲率大的流道流动损失大。

表 1 给出了挠率对平均阻力系数的影响。从表中的计算结果可以看出, Dn 取定值时, 量纲 1 挠率 τ 越大, 其 fRe_m 值越大。在 $Dn=63\sim 631$ 的范围内, $\tau_2=0.02$ 的阻力系数与 $\tau_1=0.006$ 的阻力系数相比增大了 2.48%~3.87%, 且其阻力系数增加的幅度随 Dn 的增大而增加。因此对于小量纲 1 挠率且 Dn 不

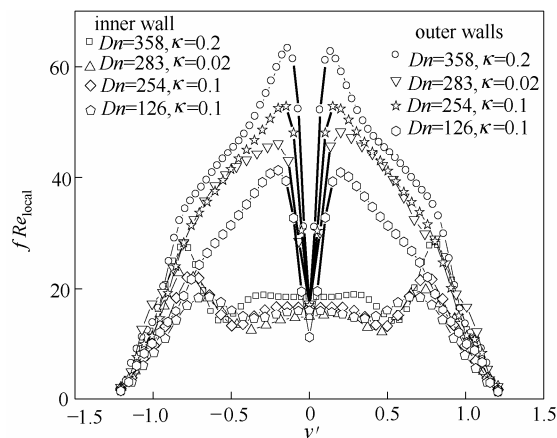


图 7 不同 Dn 时内、外壁局部阻力系数沿 y' 的分布

Fig. 7 Distribution of fRe_{local} on inner wall and outer walls along y' for different Dn

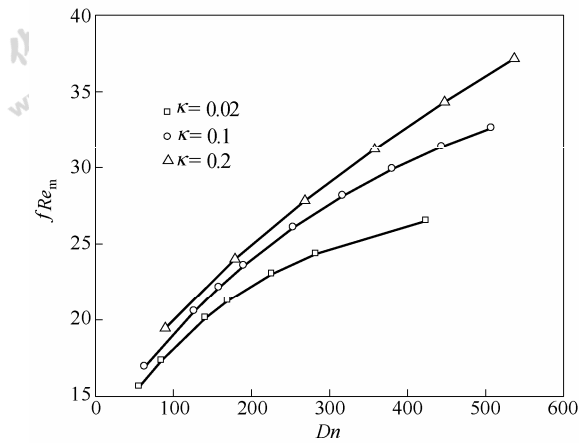
图8 不同曲率时平均阻力系数随 Dn 的变化Fig. 8 Variation of mean frictional factor with Dn for different τ

表1 挠率对平均阻力系数的影响

Table 1 Effect of τ on mean frictional factor

Dn	fRe_m		
	$\tau_1=0.006$	$\tau_2=0.02$	Diff./%
63	16.94	17.37	2.48
126	20.56	21.10	2.56
189	23.58	24.22	2.64
254	26.07	26.79	2.69
379	29.90	30.78	2.86
505	32.44	33.71	3.77
631	34.49	35.88	3.87

Note: Diff. = $(fRe_{m,\tau_2} - fRe_{m,\tau_1}) / fRe_{m,\tau_1}$.

大的流道，挠率对阻力系数的影响较小，但当 Dn 较大时，则必须考虑挠率对流体流动阻力的影响。这和 Liu 等^[23]、Bolinder 等^[13]及李雅侠等^[24]分别研究圆形截面、矩形截面及半圆管截面螺旋流道内流体流动得出的结论相一致。

综合以上结果可以得出：曲率 κ 、 Dn 及挠率 τ 增大，均会引起流体阻力系数的增加。但当 τ 及 Dn 较小时，挠率 τ 的影响较小。基于以上模拟结果，拟合出平均阻力系数的关联式为

$$fRe_m = 4.7981 Dn^{0.315} \kappa^{0.0447} \quad (11)$$

适用范围为 $56 \leq Dn \leq 635$, $0.02 \leq \kappa \leq 0.2$, $0 \leq \tau \leq 0.02$, 拟合点处的平均相对误差为 2.19%。

4 与半圆管螺旋流道的比较

螺旋角钢夹套和半圆管夹套是反应釜外两种典型的夹套型式。如前文所述三角形螺旋流道是基于工程应用螺旋角钢夹套提出的，而半圆管夹套又可看成半圆管螺旋流道。为了对比这两种夹套内流体流动阻力的大小，同时也为了更全面地分析三角

形螺旋流道的流动性能，本文按照前文所述方法对半圆管螺旋流道进行了模拟，并将三角形螺旋流道和半圆管螺旋流道的局部阻力系数及平均阻力系数进行了比较，结果示于图 9 和图 10 中。两种螺旋流道的参数取值为 $a=d=0.01$ m, $R_c=0.041$ m, $H=0.015$ m, 其中 d 为半圆管截面的直径。两种流道内流体的 Reynolds 数均取 500，半圆管螺旋流道内流体壁面的局部阻力系数及平均阻力系数分别按照式(9)和式(10)计算，并将其平均阻力系数的求解结果与文献[25]给出的经验公式[式(12)]的计算值进行了比较，其误差为 1.31%，此结果也进一步验证了本文模拟方法的正确性。

$$fRe = 4.43 Dn^{0.35} \kappa^{0.03} \quad 110 < Dn < 1100, 0.024 < \kappa < 0.12 \quad (12)$$

从图 9 可见，三角形流道和半圆管流道内壁面 fRe_{local} 沿 y' 的分布曲线形状差别不大，由于受三角形上、下两尖角的影响，在相同 Re 下三角形流道和半圆管流道相比，二次涡的中心更靠近横截面的中心线，致使内壁面局部阻力系数的峰值也更接近内壁面中心。对于内壁面两端的流体，半圆管流道的 fRe_{local} 明显较大，而壁面中心位置附近二者的差值很小。三角形流道和半圆管流道外壁面 fRe_{local} 随 y' 变化的曲线形状明显不同，半圆管流道外壁 fRe_{local} 的峰值出现在半圆弧的中心位置。虽然三角形流道外壁 fRe_{local} 的峰值大于半圆管的 fRe_{local} 峰值，但由于半圆管外壁面多数点的 fRe_{local} 都较大，所以三角形流道外壁面局部阻力系数的平均值依然较半圆管流道的小。图 10 给出的两种流道平均阻力系数的对比也表明，三角形螺旋流道的平均阻力系数比半圆

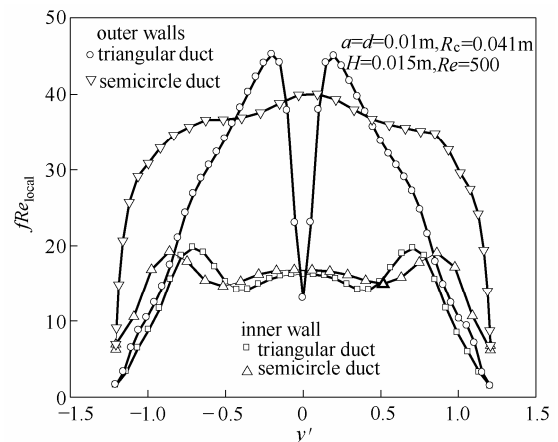


图9 三角形流道和半圆管流道内、外壁局部阻力系数的比较

Fig. 9 Comparison of fRe_{local} on inner wall and outer walls between triangular duct and semicircle duct

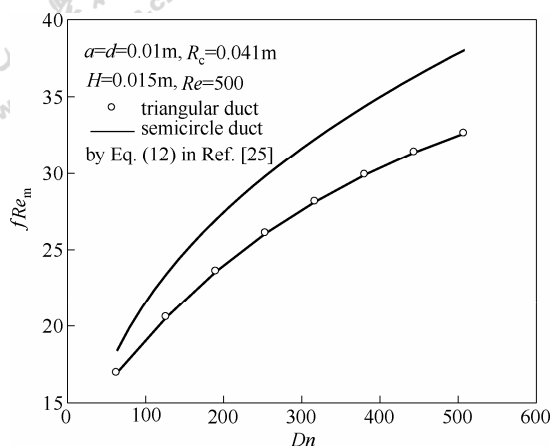


图 10 三角形流道和半圆管流道平均阻力系数的比较

Fig. 10 Comparison of fRe_m between triangular duct and semicircle duct

管的小, 约为半圆管阻力系数的 85.8%~92.2%。因此, 当两种流道 Re 、曲率半径、螺距及内壁面面积相同时, 三角形螺旋流道流体流动的阻力小, 而且随着 Dn 的增大, 三角形螺旋流道比半圆管螺旋流道阻力小的优势愈加明显。

5 结 论

(1) 由于离心力的作用, 充分发展状态下层流流体的 w 向速度朝外壁面偏移, 在流道横截面上产生两个稳定且结构基本对称的二次涡; 随着 Dn 的增大, w 向速度愈向外壁面偏移, 二次涡沿外壁方向被拉长, 两涡中心更加靠近外壁面, 且二次涡强度增强。

(2) 两外壁面 fRe_{local} 沿外壁面的分布与内壁面的大不相同, 90° 顶角处 fRe_{local} 较小, 外壁面紧靠 90° 顶角两侧出现外壁面 fRe_{local} 的最大值; 同一 Dn 下, 外壁面绝大多数的 fRe_{local} 大于内壁面的 fRe_{local} , 计算结果表明外壁面的局部阻力系数的平均值约为内壁面的 1.54~2.72 倍。

(3) 增大 Dn , 内、外壁面的 fRe_{local} 均有所增大, 因此 fRe_m 相应增大, 但 fRe_m 增大的幅度随 Dn 的增大而变小; 曲率 κ 及挠率 τ 增大, 也会引起流体 fRe_m 的增加, 但对于小 τ 及 Dn 的三角形螺旋流道, 挠率 τ 的影响很小。

(4) 三角形螺旋流道和半圆管螺旋流道内壁面 fRe_{local} 的分布差别不大, 但外壁面 fRe_{local} 的分布明显不同; 当两种流道 Re 、曲率半径、螺距及内壁面面积相同时, 三角形螺旋流道外壁面 fRe_{local} 的峰值大于半圆管 fRe_{local} 的峰值, 但 fRe_m 比半圆管的小, 约为半圆管 fRe_m 的 85.8%~92.2%。

符 号 说 明

- a —— 直角三角形斜边边长, m
- d_h —— 直角三角形截面的当量直径, m
- fRe —— 阻力系数
- H —— 螺距, m
- K —— 绕螺旋线单位弧度时 z 方向的上升高度, $m \cdot rad^{-1}$
- n —— 壁面的法线方向, m
- R_c —— 螺旋管道的曲率半径, m
- r —— 柱坐标系下的径向坐标, m
- u, v, w —— 分别为正交螺旋坐标系下的 x, y, z 方向的速度, $m \cdot s^{-1}$
- u', v', w' —— 分别为 u, v, w 的量纲 1 速度
- v_r, v_θ, v_z —— 分别为柱坐标系 r, θ, z 方向的速度, $m \cdot s^{-1}$
- x, y, z —— 正交螺旋坐标系的方向, m
- x', y' —— 分别为 x, y 的量纲 1 坐标
- z —— 柱坐标系下的轴向坐标, m
- z_0 —— 横截面斜边中点的 z 坐标值, m
- α —— 螺旋升角, rad
- δ —— 壁面切应力, Pa
- θ —— 柱坐标系下的角坐标, rad
- κ —— 量纲 1 曲率
- μ —— 流体的黏性系数, $Pa \cdot s$
- ρ —— 密度, $kg \cdot m^{-3}$
- τ —— 量纲 1 挠率
- ϕ —— 截面旋转角度, $(^\circ)$
- φ —— 沿中心线的极角, rad
- ψ —— 量纲 1 流函数
- ω —— 量纲 1 涡量

下角标

- local —— 局部值
- m —— 平均值
- w —— 壁面值

References

- [1] Zhu Xiaoqin (朱孝钦), Liu Junming (刘俊明). Process Equipment Foundation (过程装备基础) [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 260-263
- [2] Ding Qunguo (丁寔果). Chemical Vessel and Equipment Design (化工容器及设备设计) [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1996: 361-362
- [3] Wang C Y. On the low-Reynolds-number flow in a helical pipe [J]. *J. Fluid Mech.*, 1981, **108**: 185-194
- [4] Germano M. On the effect of torsion on a helical pipe flow [J]. *J. Fluid Mech.*, 1982, **125**: 1-8
- [5] Yamamoto K, Yanase S, Yoshida T. Torsion effect on the flow in a helical pipe [J]. *Fluid Dynamics Research*, 1994, **14**(5): 259-273
- [6] Yamamoto K, Yanase S, Jiang R. Stability of the flow in a helical tube [J]. *Fluid Dynamics Research*, 1998, **22**(3): 153-170

- [7] Yamamoto K, Yasuhara J, Aribowo A, *et al.* Flow through in a rotating helical pipe with circular cross-section [J]. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 2000, **21**(2): 213-220
- [8] Yamamoto K, Aribowo A, Hayamizu Y, *et al.* Visualization of the flow in a helical pipe [J]. *Fluid Dynamics Research*, 2002, **30**(4): 251-267
- [9] Futagami K, Aoyama Y. Laminar heat transfer in a helically coiled tube [J]. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1988, **31**(2): 387-396
- [10] Gong Y, Yang G, Ebadian M A. Perturbation analysis of convective heat transfer in helical pipes with substantial pitch [J]. *J. Thermophysics and Heat Transfer*, 1994, **8**(3): 587-595
- [11] Janssen L A M, Hoogendoorn C J. Laminar convective heat transfer in helical coiled tubes [J]. *Int. Heat Transfer*, 1978, **21**(9): 1197-1206
- [12] Liu S, Masliyah J H. Developing convective heat transfer in helical pipe with finite pitch [J]. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 1994, **15**: 66-74
- [13] Bolinder C J, Sundén 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
- [14] Bolinder C J. The effects of torsion on the bifurcation structure of laminar flow in a helical square duct [J]. *Trans. ASME J. Fluid Engineering*, 1995, **117**(2): 242-248
- [15] Bolinder C J, Sundén B. Flow visualization and LDV measurements of laminar flow in a helical square ducts with finite pitch [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1995, **11**(4): 348-363
- [16] Sakalis V D, Hatzikonstantinou P M, Papadopoulos P K. A numerical procedure for the laminar developed flow in a helical square duct [J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2005, **127**(1): 136-148
- [17] Chen Y T, Chen H J, Zhang B Z. Fluid flow and convective heat transfer in a rotating helical square duct [J]. *Int. J. Thermal Sciences*, 2006, **45**(10): 1008-1020
- [18] Zhang Li (张丽), Xing Yanwei (邢彦伟), Wu Jianhua (吴剑华). Flow characteristics in helical duct with rectangular cross section [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2010, **61**(5): 1089-1096
- [19] Wang Cuihua (王翠华), Tang Mi (唐密), Wu Jianhua (吴剑华), Kou Liping (寇丽萍). Laminar flow characteristics in helical duct with right-angled isosceles triangle cross section [J]. *The Chinese J. Process Engineering* (过程工程学报), 2012, **12**(5): 754-759
- [20] Germano M. The Dean equations extended to a helical pipe flow[J]. *Fluid Mech.*, 1989, **203**: 289-305
- [21] Gui Keting (归柯庭), Wang Jun (王军), Wang Qiuying (王秋颖). *Engineering Fluid Mechanics* (工程流体力学) [M]. Beijing: Science Press, 2003: 12-14
- [22] Mao Deming (毛德明), Feng Lianfang (冯连芳), Xu Guojun (许国军). Effect on control volume and measured points when the beams pass through circular mediums [J]. *J. Experimental Mechanics* (实验力学), 1996, **11**(1): 12-17
- [23] Liu S, Masliyah J H. Axially invariant laminar flow in helical pipes with a finite pitch [J]. *J. Fluid Mechanics*, 1993, **251**: 315-353
- [24] Li Yaxia (李雅侠), Wang Hang (王航), Wu Jianhua (吴剑华), Gong Bin (龚斌). Laminar flow and heat transfer characteristic in half-coiled jacket [J]. *Chemical Engineering (China)* (化学工程), 2010, **38**(6): 35-38
- [25] Li Yaxia (李雅侠), Wang Hang (王航), Wu Jianhua (吴剑华). Fully developed laminar flow and heat transfer characteristics in half coil jackets [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2010, **61**(11): 2796-2803