

S 形复合管道周期流动的数值研究

麻剑锋, 沈新荣, 章本照

(浙江大学 工程力学系, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 采用贴体坐标系下的 SIMPLE 方法研究了 S 形复合管道中三维周期性充分发展的层流流动. 对流项采用一阶迎风格式和 QUICK 格式相结合的方法, 保证了解的收敛性和高精度特性. 数值实验表明, 在一个流动周期内, S 形复合管道中前后两个半圆弧段中的流动结构一致, 但二次流旋转方向和轴向速度的偏移方向相反. 曲率对流动有很大的影响, 曲率越大轴向速度的最大值越小, 二次流的最大值越大. 在前后半个周期开始阶段, 二次流都有一个突然变小和改变旋转方向的过程. 流动阻力随着曲率的增大而增大.

关键词: S 形复合管道; 周期流动; 二次流动

中图分类号: O351

文献标识码: A

文章编号: 1008-973X(2006)08-1408-05

Numerical analysis of periodic flow in S-shaped composite pipes

MA Jian-feng, SHEN Xin-rong, ZHANG Ben-zhao

(Department of Engineering Mechanics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The three dimensional periodic fully developed laminar flow in S-shaped composite pipes was studied using semi-implicit method for pressure linked equations (SIMPLE) scheme in the body-fitted coordinate system. To ensure the convergence and accuracy of the results, first upwind scheme and quadratic upstream interpolation for convective kinematics (QUICK) scheme were combined to discretize the convective terms. Numerical results showed that the flow structures of the former half and latter half are the same in one periodicity. However, the rotation direction of secondary flow and the departure of axial velocity are opposite. Curvature has great influence on the flow; the maximum axial velocity decreases as curvature increases and the maximum secondary flow behaves oppositely. At the beginning of the former half and latter half of the periodicity, the magnitude of secondary flow decreases sharply and the rotation direction changes suddenly. The flow resistance increases with the increase of curvature.

Key words: S-shaped composite pipes; periodic flow; secondary flow

曲线管道是化工设备、动力装置或者运输机械中常见的管道系统部件, 对流体的运输和热交换起着重要作用. 实验和理论研究都已证明当曲线管道内流体流动时会产生二次流, 二次流相对于轴向的主流而言在量级上虽然比较小, 但在物质的传输与分离、热交换等方面所起的作用却不可忽视. 由于曲线管道在工程实际中的重要意义, 许多学者对其进行了广泛深入的研究. Dean^[1-2] 采用摄动法首次求

解了小曲率圆截面弯管内的流动. Berger 等人^[3-4]、Ito^[5] 对弯曲管道内的流动与传热特性进行了总结. Wang^[6] 和 Germano^[7] 分别推导了非正交坐标系以及正交坐标系下螺旋管内部流动的基本方程, 并求解了圆截面螺旋管道的内部流动, 证明了挠率对于流动结构有显著的影响. 此外章本照等人^[8] 以及 Chen 等人^[9] 研究了各种截面曲线管道内流动和传热的特性.

收稿日期: 2005-05-17.

浙江大学学报(工学版)网址: www.journals.zju.edu.cn/eng

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10272096).

作者简介: 麻剑锋(1980—), 男, 浙江杭州人, 博士生, 从事计算流体力学以及计算传热学的研究. E-mail: mec_zbzq@zju.edu.cn

曲线管道所包含的管道类型很多,但从已有的文献来看,曲线管道研究的重点都集中于平面弯曲管道以及螺旋管道内充分发展的流动和传热特性.而对于在实际应用过程中常遇到的 S 形复合管道并没有进行过任何形式的研究.现有的研究表明流体在弯曲管道内流动时,轴向速度的最大值会偏向管道的外弯侧.当流体在 S 形复合管道流动时,其轴向速度的最大值必然有一个从管道下表面向上表面转移的过程,这就使得它内部的流动和传热特性与平面弯管有很大的不同.本文将着重研究曲率和雷诺数对于 S 形复合管道内的二次流、轴向速度以及流阻的影响.

1 物理问题及其控制方程

如图 1 所示, S 形复合管道两个半圆弧的曲率半径都为 R , 管道圆截面的半径为 r . 假定管道内的流体不可压, 流动定常并且在 x 方向周期性充分发展. 在周期性充分发展的流动中, 每经过一个周期长度总的压降是一个固定值, 所以可以把压力沿着主流方向的变化表示成

$$p^* = p^* - \beta x^*. \quad (1)$$

式中: β 为一个周期中的平均压力梯度, 在本文所考虑的情形中是一个常数; p^* 为局部位置上的压力偏离平均值的差值, 是一个周期性的分量.

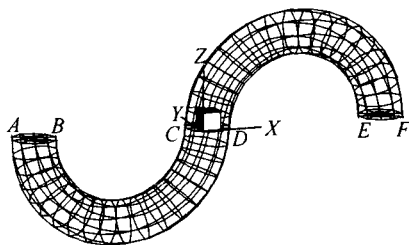


图 1 S 形复合管道示意图

Fig. 1 S-shaped composite pipe and coordinate system

引入如下无量纲量:

$$\kappa = r/R, (x, y, z) = (x^*, y^*, z^*)/r, p = p^* r^2 / (\rho \nu^2), Re = U_0 r / \nu, (u, v, w) = (u^*, v^*, w^*) / U_0,$$

式中: 带 * 的为有量纲物理量, r 为圆截面曲率半径, R 为管道曲率半径, 特征速度

$$u_0 = \frac{r^2}{4\nu} \left(-\frac{dp^*}{dx^*} \right),$$

为在 $-dp^*/dx^*$ 的压力梯度下周期性充分发展的圆管内速度的最大值. 假定 β 等于使得充分发展的圆管内的最大速度为 U_0 的压力梯度 $-dp^*/dx^*$, 那么 $\beta = 4/Re$. 直角坐标系下无量纲的流体运动方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{Re^2} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{4}{Re} + \frac{1}{Re} \Delta \cdot u, \quad (3)$$

$$\frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\frac{1}{Re^2} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \Delta \cdot v, \quad (4)$$

$$\frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} = -\frac{1}{Re^2} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \Delta \cdot w. \quad (5)$$

式中的 $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$, 把方程 (2)~(5) 转换成计算平面上的通用方程. 设 x, y, z 为物理平面上坐标, ξ, η, γ 为计算平面坐标: $\xi = \xi(x, y, z)$, $\eta = \eta(x, y, z)$, $\gamma = \gamma(x, y, z)$, 变换后计算平面上的方程可以写为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \xi} (\bar{U} \phi) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\bar{V} \phi) + \frac{\partial}{\partial \gamma} (\bar{W} \phi) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\Gamma_{\xi}}{J} (\alpha_1 \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + \right. \\ \left. \alpha_2 \frac{\partial \phi}{\partial \eta} + \alpha_3 \frac{\partial \phi}{\partial \gamma} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\Gamma_{\eta}}{J} (\beta_1 \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + \beta_2 \frac{\partial \phi}{\partial \eta} + \beta_3 \frac{\partial \phi}{\partial \gamma} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial \gamma} \left[\frac{\Gamma_{\gamma}}{J} (\gamma_1 \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + \gamma_2 \frac{\partial \phi}{\partial \eta} + \gamma_3 \frac{\partial \phi}{\partial \gamma} \right] + JS_s. \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$ 为逆变速度, ϕ 为物理平面上的物理量, J 为 Jacobi 变换关系式, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ ($i=1, 2, 3$) 为只与坐标变换相关的参数, S_s 为源项. 这些参数的具体表达式可以参见文献 [10].

2 方程的离散和周期性边界条件的处理

本文中控制方程的离散和所有的计算都在转换后的计算平面上进行, 采用控制容积法对方程进行离散. 用 SIMPLE 来实现速度和压力的解耦. 方程式 (6) 中出现了两种形式的速度, 在计算过程中以直角坐标系物理平面上的速度 (u, v, w) 作为求解变量. 由于 S 形复合管道几何形状的复杂性, 在计算过程中发现直接采用 QUICK 格式来处理对流项时不容易收敛. 所以在本文的计算过程中, 先采用绝对稳态的一阶迎风格式来处理对流项, 当计算收敛后再把对流项改为 QUICK 格式, 以一阶迎风得到的结果为初值重新计算. 这样既解决了方程的收敛性问题又提高了求解的精度. 在管道的入口和出口处用与周期性边界条件, 采用 CTDMA 方法进行求解. CTDMA 的具体求解步骤参见文献 [11].

为了消除网格对于计算结果的影响, 本文采用不同密度的网格进行了网格实验. 实验结果表明, 当截面网格数目为 30×30 、周期方向的网格数目为 120 时, 网格对于计算结果的影响可以忽略不计. 本文所有的结果都基于上面这套网格系统.

3 计算结果和讨论

如前所述,在计算平面上对 Navier-Stokes (NS)方程进行求解时还会出现两种形式的速度.在计算过程中采用物理平面上的速度作为求解变量,但计算结果的显示和处理过程中将采用逆变速度,因为物理平面上的速度并不能有效地反映出S形复合管道中垂直于轴线的各个截面上速度的分布情况,而逆变速度则可以方便地表示.所以在下面的讨论中,如果没有特殊说明,所有的速度都指逆变速度.为了便于讨论,对垂直于轴线的各个截面进行标记,图1中平面AB记为 0° ,平面CD记为 180° ,平面EF记为 360° ,其他平面以此类推.

图2给出了 $\kappa=0.2, Re=500$ 时不同截面上轴

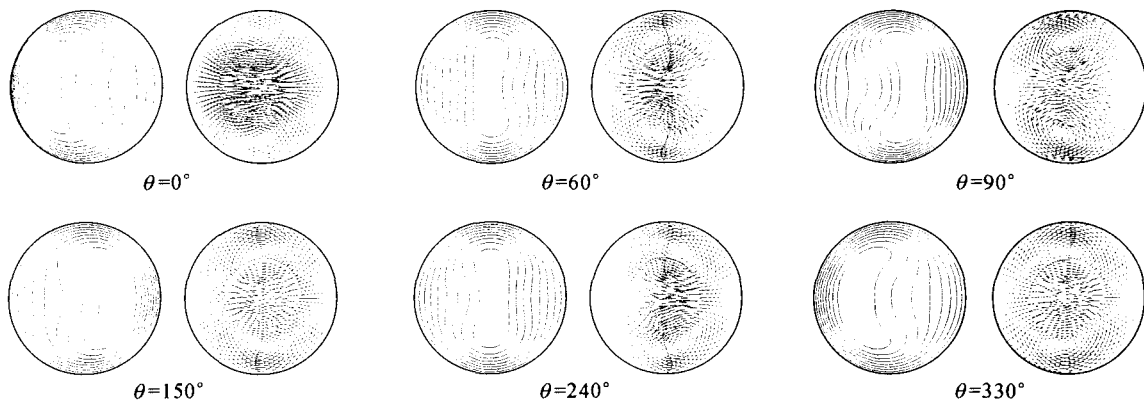


图2 不同截面上的轴向速度和二次流分布

Fig. 2 Distribution of axial velocity and secondary flow in different cross-section

150° 和 $\theta=330^\circ$ 这两对截面的轴向速度和二次流的结构一致,只是二次流旋转以及轴向速度的偏移方向刚好相反.仔细研究这两对截面可以发现,假设沿着 $\theta=180^\circ$ 这个截面把复合管道一分为二,那么这两对截面在各自所在管道中的位置完全一致.由此可以推测如果不考虑方向,一个流动周期内S形复合管道的前半段和后半段的流动结构相同.为了验证上面的这个推测,图3和4分别给出了当 $Re=500$ 时, $\kappa=0.1, 0.2, 0.5$ 三种曲率下各个截面轴向速度最大值 U_{\max} 以及二次流最大值 S_{\max} ($S_{\max} = (\sqrt{V^2 + W^2})_{\max}$)沿轴线的分布情况.图5给出了当 $\kappa=0.1$ 时, $Re=100, 200, 500$ 三种雷诺数下各个截面轴向速度和二次流最大值的情况.从图上可以看出不管曲率和雷诺数如何变化,在一个周期内S形复合管道前后半段的轴向速度和二次流最大值沿轴线变化的情况完全一致.由此可以证明一个流动周期内S形复合的前半段和后半段的流动结构相同.

向速度等值线图以及二次流的矢量图(图中圆截面的左侧代表图1所示S形复合管道的下侧面).从图中可以看出在一个周期的起始阶段,轴向速度的最大值偏向管道截面的内弯侧.由于在复合管道的前半个周期内,由曲率引起的离心力指向截面的外弯侧,这使得轴向速度的最大值区域不断向外弯侧偏移.在 $\theta=60^\circ$ 截面附近,轴向速度的最大值区域出现在截面的中心,随后逐步达到截面的外弯侧.当流体的流经复合管道的后半周期时,由于几何形状的改变,由曲率引起的离心力改变了方向,轴向速度最大值区域又开始逐步移向复合管道的下半侧.在一个周期内,二次流的结构没有变化,都表现为二涡结构,但是二次流的强度,旋转方向以及涡的位置都明显不同.

从图2还可以发现 $\theta=60^\circ$ 和 $\theta=240^\circ$ 以及 $\theta=$

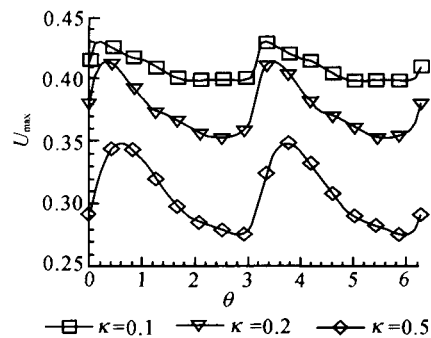


图3 轴向速度最大值沿轴线的分布

Fig. 3 Distribution of maximum axial velocity along axis

由本文的无量纲量可知, Re 数相等表示在一个周期内平均压降相等.图3和4表明,当平均压降相等时,曲率越小,各个截面上轴向速度的最大值越大;而二次流刚好相反,随着曲率的增大,二次流在整体上逐渐变大.图4表明在前后这两个半段的开始阶段,二次流的最大值有一个突然变小的过程,这

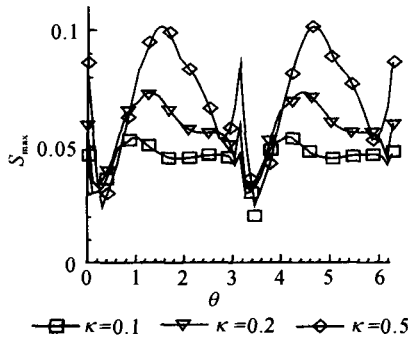


图 4 二次流最大值沿轴线的分布

Fig. 4 Distribution of maximum secondary flow along axis

是由于曲率引发的离心力突然改变方向,迫使二次流的旋转方向发生改变,从而使得二次流突然变小.二次流方向的改变可以从图 2 中得到证实,在 $\theta=0^\circ$ 时顺时针方向旋转,而 $\theta=60^\circ$ 时则逆时针方向旋转.

在图 5 中显示了 Re 越大,轴向速度最大值越小,这主要是由无量纲造成的.因为本文所取的特征速度中含有压力梯度, Re 越大压力梯度就越大,使得特征速度也随之增大,这就导致了无量纲速度变小.

现有的研究表明,当流体在平面弯管内达到充分发展时,其流动结构和大小就不再发生变化.从图 3~5 可以看出,当 κ 和 Re 较小时,在复合管道前后两个半段的中间部分也出现了类似平面弯管充分发

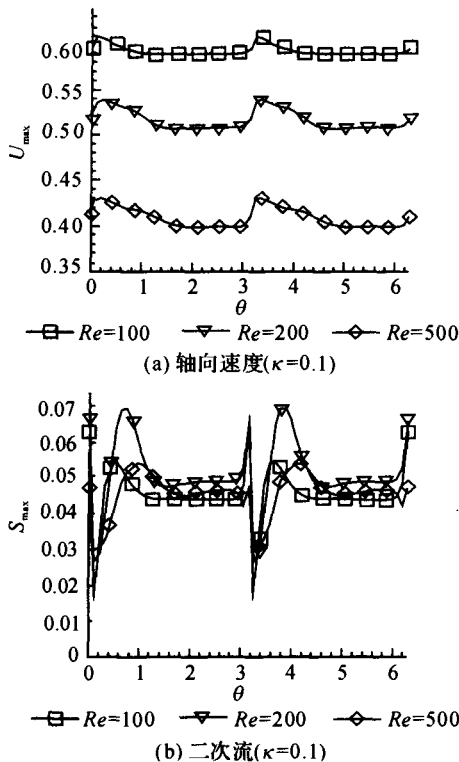


图 5 Re 对轴向速度最大值和二次流的影响

Fig. 5 Effects of Re on maximum axial velocity and secondary flow

展的流动状态,轴向速度和二次流的最大值在一段距离内没有明显的变化.

管道内的流动阻力是管道研究的一个重要组成部分,可以用两种方法进行研究:一种方法是给定流量看流经相同距离之后的压降,压降越大流阻越大;另一种方法是给定压降看通过管道内的流量,流量越小流阻越大.本文采用后者来研究曲率对于流阻的影响.整个截面的流量可以定义为

$$Q = \int_A \bar{U} dA. \quad (7)$$

表 1 给出了不同 Re 、不同 κ 下的流量比 γ ($\gamma=Q/Q_s$, Q_s 为相同压力梯度下直管内周期性充分发展的流量).从表中可以清楚地看出随着 κ 的增大,流量比逐渐减小,这意味着与等压力梯度下的直管相比曲率越大流阻越大.当 $Re=500, \kappa=0.5$ 时的流量仅为相同条件下直管流量的 30%,由此可以看出曲率对流阻有很大的影响.

表 1 曲率 κ 对于流量比 γ 的影响

Tab. 1 Effects of curvature κ on flow ratio γ

Re	κ		
	0.1	0.2	0.5
100	0.61	0.57	0.49
200	0.55	0.50	0.40
500	0.47	0.43	0.30

为了验证数值方法的可靠性,采用本程序计算了直管道内周期性充分发展的流动,得到轴向速度的最大值为 0.999,非常接近解析值 1.0.同时还计算了当 $\kappa=0.05, Re=500$ 时平面弯管内充分发展的流动,从图 6 可以看到本文的数值结果与 Xu^[12] 的 Galerkin 解非常吻合.

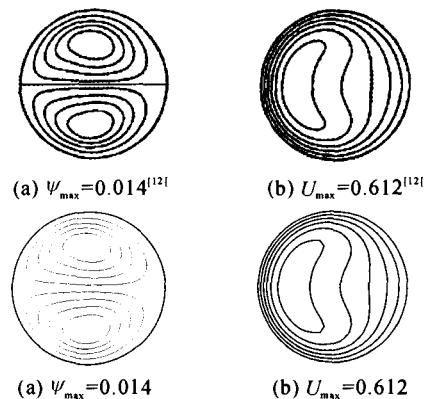


图 6 计算结果比较

Fig. 6 Comparison of results

4 结 论

本文采用三维贴体坐标并结合计算平面上的 SIMPLE 方法,对 S 形复合管道内周期性充分发展的层流流动进行了数值研究,得到如下结论:

(1) 在一个流动周期内,S 形复合管道中前半圆弧和后半圆弧段相对应截面上的流动结构一致,但二次流的旋转方向以及轴向速度的偏转方向恰好相反。

(2) 当曲率和雷诺数较小时,复合管道中部分管路的流动特性与平面弯管内充分发展流动相类似,轴向速度和二次流的最大值在这些部分几乎不发生变化。

(3) 曲率对流动结构和流动阻力有很大的影响,曲率越大轴向速度的最大值越小,二次流的最大值越大。在前后半个周期开始阶段,二次流都有一个突然变小和改变旋转方向的过程。流动阻力随着曲率的增大而增大。

参考文献(References):

- [1] DEAN W R. Note on the motion of fluid in a curved pipe [J]. *Philosophical Magazine*, 1927,7(4):208-223.
- [2] DEAN W R. The stream-line motion of fluid in a curved pipe [J]. *Philosophical Magazine*, 1928,7(5):673-695.
- [3] BERGER S A, TALBOT L, YAO L S. Flow in a curved pipe [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1983,15:410-512.
- [4] BERGER S A. Flow and heat transfer in curved pipes

- and tubes [J]. *AIAA Paper*, 1991,91-0030:1-19.
- [5] ITO H. Flow in curved pipe [J]. *Japan Society of Mechanical Engineers International*, 1987,30:543-552.
- [6] WANG C Y. On the low-Reynolds-number flow in a helical pipe [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981,108:185-194.
- [7] GERMANO M. On the effect of torsion on a helical pipe flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982,125:1-8.
- [8] 章本照,张金锁,陈华军,等. 环形截面小曲率弯管内黏性流动的摄动解[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2001,35(3):342-346.
- ZHANG Ben-zhao, ZHANG Jin-suo, CHEN Hua-jun, et al. Perturbation solution of the flow in curved annular pipe with small curvature [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2001,35(3):342-346.
- [9] CHEN H J, ZHANG B Z, MA J F. Theoretical and numerical analysis of convective heat transfer in the rotating helical pipes [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003,46:4899-4909.
- [10] 严传俊. 三维贴体坐标系下燃烧室中两相反应流的数值模拟[J]. *燃烧科学与技术*, 1995,1(1):54-62.
- YAN Chuan-jun. A Numerical simulation of two-phase reacting flow in a combustor using 3-D body-fitted coordinate system [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 1995,1(1):54-62.
- [11] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社,2001:267.
- [12] XUE L. Study on laminar flow in helical circular pipes with Galerkin method [J]. *Computers & Fluids*, 2002, 31: 113-129.

下期论文摘要预登

网络化制造环境中的 Web 服务模糊匹配研究

吴 健,李 莹,邓水光,吴朝晖

(浙江大学 计算机科学与技术学院,浙江 杭州 310027)

摘 要: 针对网络化制造中 Web 服务在语义方面表达不足而难以搜索到合适服务的问题,提出 Web 服务的模糊匹配方法。通过分析网络化制造特点,构建网络化 Web 服务本体,增加网络化制造 Web 服务的语义描述。在给出多种服务相似度计算方法基础上,提出网络化制造 Web 服务模糊匹配方法,用相似度计算定量地描述所需服务和候选服务间的匹配程度。分析结果表明,该方法增强了 Web 服务能力的表达,给 Web 服务模糊匹配提供清晰的研究对象,推动网络化制造从信息集成向服务集成的转变,为服务选用时的决策自动化提供量化参考。

关键词: Web 服务;本体;相似度;模糊匹配