

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.01.001

弯曲通道内黏弹性流体二次流现象的数值研究

刘唐京¹, 王企鲲^{1,2*}, 邹 赫¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;
2. 上海理工大学 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘 要:流体流经弯曲通道在其截面上会产生二次流现象,而黏弹性流体和牛顿流体有着不同的流动特性,流体的黏弹性对弯管内二次流能起到强化作用。为了探究黏弹性流体对弯管内二次流的影响因素,课题组采用 FLUENT 软件对弯曲通道中黏弹性流体的二次流特性进行数值模拟,流体的黏弹性通过 UDF 来实现;研究了魏森贝格数 Wi 、溶质黏度比 β 以及管道的几何结构对黏弹性流体二次流强度的影响。模拟结果表明: Wi 数对弯道中的二次流强度存在非单调关系;流体的黏性越大,管内主流速度越大,从而加强管道内二次流效应;通道的几何结构如曲率比、弯道的个数对二次流都有较大的影响,曲率比越大,管内二次流越强。弯管内二次流的研究,对工程中利用弯管来加强对流和换热有一定参考意义。

关 键 词:黏弹性流体;二次流;弯管;Giesekus 模型

中图分类号:O359;TH164 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2022)01-0001-07

Numerical Study of Secondary Flow Phenomenon of Viscoelastic Fluid in Curved Channel

LIU Tangjing¹, WANG Qikun^{1,2*}, ZOU He¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering,
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Fluid flowing through a curved channel will produce a secondary flow phenomenon on its cross-section. Viscoelastic fluid and Newtonian fluid have different flow characteristics. The viscoelasticity of the fluid can strengthen the secondary flow in the bend pipe. In order to explore the influence factors of the viscoelastic fluid on the secondary flow in the bend pipe, the FLUENT software was used to numerically simulate the secondary flow characteristics of the viscoelastic fluid in the bend pipe, and the viscoelasticity of the fluid was realized by UDF. The effects of Weissenberg number Wi , solute viscosity ratio β , and pipe geometry on the strength of the secondary flow of viscoelastic fluid were studied. The simulation results show that there is a non-monotonic relationship between the Wi number and the intensity of the secondary flow in the pipe. The greater the viscoelasticity of the fluid, the greater the velocity of the main flow in the pipe, thereby enhancing the secondary flow effect in the pipe. The geometric structure of the channel such as the curvature ratio and the number of bends have a greater impact on the secondary flow. The greater the curvature ratio, the stronger the secondary flow in the pipe. The study of secondary flow in bend pipe has certain reference significance for strengthening convection and heat transfer by using bend pipe in engineering.

Keywords: viscoelastic fluid; secondary flow; bend pipe; Giesekus model

收稿日期:2021-08-14;修回日期:2020-11-25

基金项目:教育部博士点基金资助项目(20113120120003)。

第一作者简介:刘唐京(1997),男,江西赣州人,硕士研究生,主要研究方向为黏弹性流体的数值研究。通信作者:王企鲲(1978),男,浙江嘉兴人,工学博士,副教授,中国机械工程学会会员,上海力学学会会员,主要研究方向为叶轮机械流体动力学、低雷诺数黏性流体力学等。E-mail:wangqk@usst.edu.cn

在一定条件下,流体流经弯曲管道在其截面上会产生二次流,其产生机理在于离心力所引起的管中心流体与边壁流体的动量差^[1]。针对这个现象,国内外有很多学者通过解析求解、实验和数值模拟等方法对弯曲管内流动进行了大量的研究。DEAN^[2-3]通过求解 N-S 方程发现了弯曲管道内存在双涡旋结构的二次流——迪恩涡。DATTA 等^[4]通过实验与数值模拟方式对螺旋管道内的湍流流动进行了研究。对于牛顿流体,只有流经弯曲通道,在惯性和曲率的影响下才会有二次流的产生。相比之下,黏弹性流体却有很大的不同,即使在没有惯性和曲率的情况下依然能产生二次流。LI 等^[5]^[6]发现黏弹性流体在矩形截面直管中也产生了二次流,因此黏弹性流体对于二次流的产生是有强化作用的。POOLE 等^[6]对蛇形管中黏弹性流体的流动现象做了探究,研究了曲率半径、截面高宽比和总黏度比对二次流强度的影响。SUN 等^[7]对麦克斯韦流体流经矩形截面弯曲管道的不可压缩流动进行了数值模拟,详细讨论了大迪恩数、德博拉数和曲率对流体流动特性的影响。

而在弯曲方形截面通道中黏弹性流体对于二次流影响的研究还是比较缺乏的。课题组主要是利用模拟仿真软件(FLUENT)来探究魏森贝格数 Wi 、溶质黏度比 β 以及管道的几何结构对黏弹性流体二次流强度的影响。弯管内二次流的研究,对于工程中利用弯管来加强管内对流、换热等有一定的理论指导作用。

由于 FLUENT 计算流体动力学代码中没有黏弹性流体的本构模型,用户需要自行定义并导入 FLUENT 中,详情可参考文献[8]。微分型黏弹性流体模型对任意黏弹性流体流动具有很好的通用性,能真实地描述黏弹性流体流动特性。其主要本构模型有 Oldroyd-B 模型^[9]、FENE-P 模型^[10]和 Giesekus 模型^[11]。LI 等^[5]^[6]通过对黏弹性流体流动中二次流的准确预测,证明了利用 UDF 将 Giesekus 本构模型嵌入 FLUENT 软件的可行性。课题组采用 Giesekus 模型进行研究,探究黏弹性流体对弯管内二次流的影响因素。

1 计算模型与方法

1.1 计算模型与网格划分

POOLE 等^[6]就各种比例的通道截面对二次流强度的影响进行了研究,发现方形截面管道所产生的二

次流强度最大。课题组亦采用截面方形弯管进行数值模拟,它由 2 段直管道与 4 段半圆弯曲管道组成,其截面边长为 10 mm。为了尽可能消除入口效应,在弯曲段入口前预留 10 倍当量直径的直管段(方形弯管的当量直径即其截面边长)。方形弯管的结构参数见表 1,表中 d 为弯管的当量直径, R 为弯曲管道的曲率半径。将描述管道弯曲程度的曲率比定义为曲率比 r_c ,即 $r_c = d/2R$ 。

表 1 管道结构参数

Table 1 Pipeline structure parameters

管编号	d/mm	R/mm	r_c
I	10	10	0.500
II	10	9	0.556
III	10	8	0.625
IV	10	7	0.714

使用 ICEM 对方形弯管进行网格划分,在弯曲管道近壁面处进行网格加密处理,对整个流体域采用六面体结构化网格。为了保证计算的准确性和经济性,课题组对网格进行了无关性验证。计算工况为 I 号管, $Re = 40$, $Wi = 0.7$, $\beta = 0.5$, 结果如图 1 所示。从图中可看出,当网格数大于 70 万时,不同网格数的计算结果误差非常小。同时考虑到计算经济性,对于后面的数值模拟计算,网格数量均控制在 70 万左右。I 号管计算模型如图 2 所示。

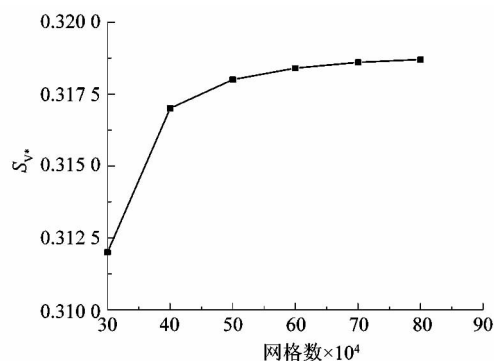


图 1 网格无关性验证

Figure 1 Grid independence verification

1.2 计算方法

牛顿流体与黏弹性流体有着不同的流动特性,课题组选用 Giesekus 模型来表现流体的黏弹性特征。考虑流动是三维、不可压缩、层流和等温的,连续性方程和动量方程可所示为:

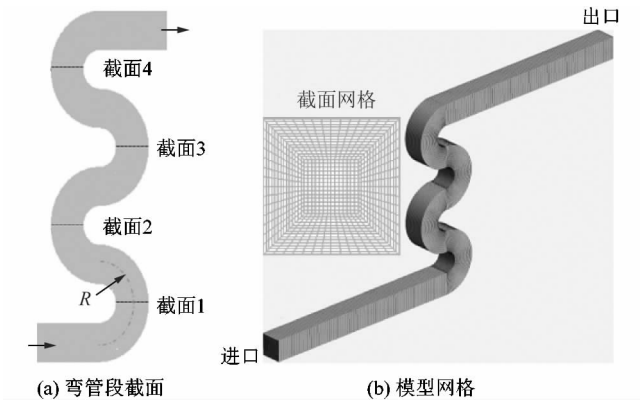


图2 I号管计算模型

Figure 2 Calculation model of pipe I

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}^s}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}^p}{\partial x_j}. \quad (2)$$

式中: u_i 为速度分量; x_i 为笛卡尔坐标系下的坐标分量, $i=1,2,3$; ρ 为密度, 其值为 998.2 kg/m^3 ; p 表示压强; τ_{ij} 是应力张量。

对于黏弹性流体, τ_{ij} 表示为:

$$\tau_{ij} = \tau_{ij}^s + \tau_{ij}^p. \quad (3)$$

式中: τ_{ij}^s 是黏性应力张量, τ_{ij}^p 是弹性应力张量。

τ_{ij}^s 和 τ_{ij}^p 的本构方程为:

$$\tau_{ij}^s = \mu_s \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad (4)$$

$$\tau_{ij}^p = \frac{\mu_p}{\lambda} (f(r) C_{ij} - \delta_{ij}). \quad (5)$$

式中: μ_s 为溶剂黏度, 其值设为 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; μ_p 为聚合物或表面溶质黏度; λ 为松弛时间; δ_{ij} 为 Kroneker 符号, $i=j$ 时取值为 1, $i \neq j$ 时取值为 0; $f(r)$ 为 Peterlin 函数, 对于 Giesekus 模型, $f(r) = 1$; C_{ij} 为聚合物或表面活性剂分子的变形率张量。

C_{ij} 的输运方程为:

$$\frac{\partial C_{ij}}{\partial t} + u_k \frac{\partial C_{ij}}{\partial x_k} = C_{ik} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + C_{kj} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} - \frac{1}{\lambda} [\alpha C_{ik} C_{kj} + (1-\alpha) \delta_{ik} C_{kj} - \alpha \delta_{kj} C_{ik} - (1-\alpha) \delta_{ij}]. \quad (6)$$

式中 α 为非线性衰减系数, 反映黏弹性流体的剪切稀化现象。为了改善数值计算的收敛性和稳定性, 通常在式(6)右边添加人工黏性耗散项, 即 $\kappa \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial C_{ij}}{\partial x_k} \right)$, κ

为人工黏性系数。

计算工况的选取及数据分析都是基于量纲为一的参数, 将描述黏弹性流体流动的雷诺数 Re 、魏森贝格数 Wi 和溶质黏度比 β 定义如下:

$$Re = \frac{\rho u_m d}{\mu_0}; \quad Wi = \frac{\lambda u_m}{d}; \quad \beta = \frac{\mu_p}{\mu_0}. \quad (7)$$

式中: u_m 为主流平均速度; d 为特征长度, 这里选取管道截面边长; $\mu_0 = \mu_s + \mu_p$ 。

二次流量纲为一的强度 S_V^* 定义为:

$$S_V^* = \frac{\frac{1}{A} \int_A \sqrt{u^2 + w^2} dA}{u_m}. \quad (8)$$

式中: A 为横截面积, u 为沿着 x 轴方向的流速, w 为沿着 z 轴方向的流速。

1.3 求解格式与人工黏性系数

在 FLUENT 中用双精度进行计算, 采用 COUPLED 格式来处理速度与压力的耦合, 压力方程的离散采用标准格式, 动量方程和用户自定义标量方程的离散采用 QUICK 格式。为了使计算能够收敛, 在式(6)中添加了人工黏性项, 通过调整人工黏性项系数 κ , 使得每个计算工况都能得到收敛解。对于不同的 Re 数和 Wi 数都存在临界人工黏性系数 κ_c , 当小于这个临界值时, 计算将会发散。表 2 给出了各工况下的 κ_c 值。

表2 临界人工黏性系数

Table 2 Critical artificial viscosity coefficient m^2/s

Wi	$\kappa_c \times 10^{-5}$			
	$Re = 5$	$Re = 10$	$Re = 20$	$Re = 40$
0.01	0.041	0.080	0.150	0.285
0.05	0.215	0.415	0.805	1.500
0.07	0.260	0.450	0.865	1.700
0.10	0.350	0.540	0.950	1.800
0.50	1.800	2.900	4.500	8.500
0.70	2.200	3.800	6.300	15.000

为了得到每一工况下合适的人工黏性系数 κ , 针对 κ 值对计算结果的影响进行了研究。表 3 给出了工况为 I 号管, $Re = 40$, $Wi = 0.7$, $\beta = 0.5$, 不同 κ 值下的二次流强度。从表 3 中可看出, 二次流强度是随着 κ 值的增大而减小的, 其可能原因是较大的 κ 值带来了较大的耗散, 从而弹性影响减弱。因此为了得到更准确的计算结果, 对于每个计算工况, 课题组均采用临界人工黏性系数。

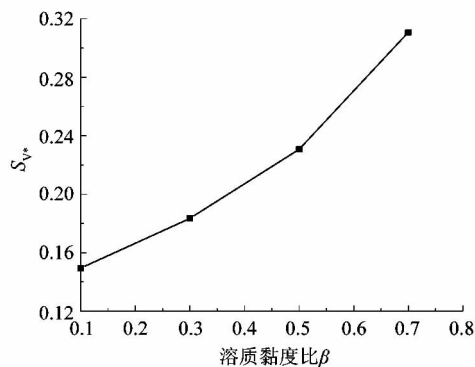
表 3 不同 κ 值下的二次流强度Table 3 Intensity of secondary flow under different κ

$k \times 10^{-4}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$		$k \times 10^{-4}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	
50.00	0.217	5.00	0.223
15.00	0.220	1.50	0.223

2 模拟结果与分析

2.1 溶质黏度比 β 对二次流的影响

溶质黏度比 β 的取值范围是 0 ~ 1, 它代表溶质的质量分数, 当取 β 为 0 时, 流体为牛顿流体。本次模拟选用 I 号管道, 雷诺数为 40, β 分别取 0.1, 0.3, 0.5 和 0.7。图 3 显示了不同 β 值时管道截面 1 所对应的二次流强度。结果表明: β 值越大即流体的黏弹性越强, 在管道截面处产生的二次流强度就越高, 这与文献 [5] 62 页叙述采用直管模拟得到的结果类似。从图 4 中可看出, 流体的黏度越高, 在管道截面处的径向主流速度越大, 从而加大了边壁流体与中心流体的动量差, 产生的二次流因此加强。

图 3 二次流强度随 β 变化趋势Figure 3 Trend of secondary flow intensity with β

2.2 Wi 数对二次流的影响

松弛时间 λ 是指在施加干扰之后, 黏弹性流体达到另一平衡条件的特征时间。 λ 对一次流动和二次流动的强度都有很大的影响。 λ 越大, 流体的性能越像固体; 当 λ 达到零时, 它为牛顿流体。

选用 I 号管道进行仿真模拟, Re 分别为 5, 10, 20 和 40, β 和 α 都设置为 0.5 时, Wi 数的取值为 0.01 ~ 0.70。输出各截面二次流强度取平均值, 得到 S_v^* 与 Wi 的关系如图 5 所示。

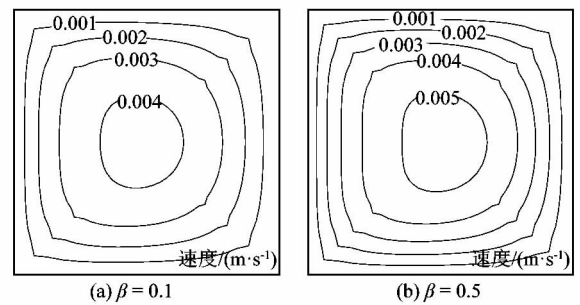
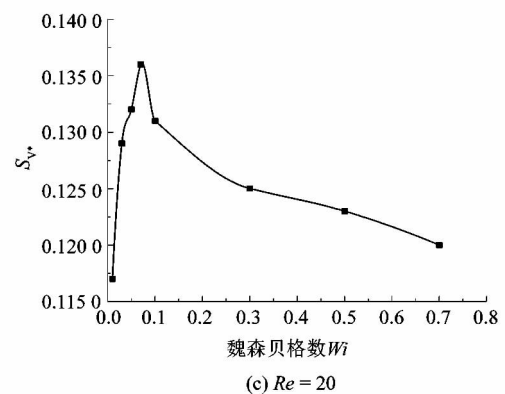
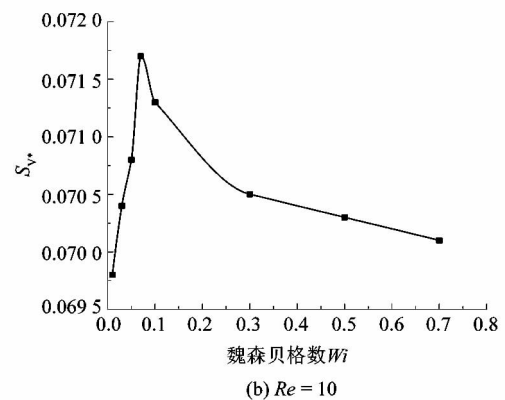
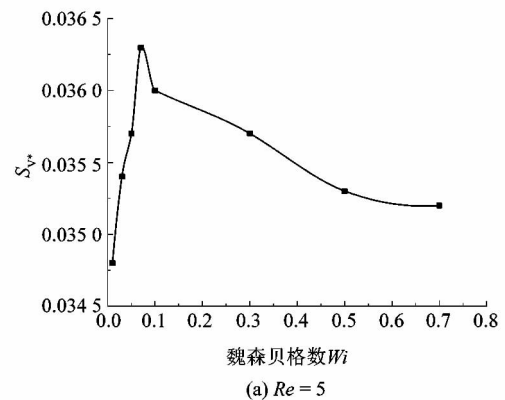
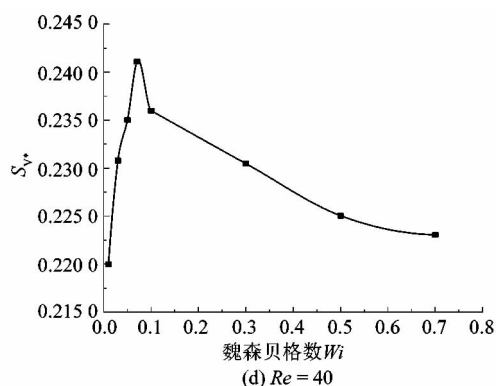


图 4 截面 1 处的主流速度分布

Figure 4 Mainstream velocity distribution at cross section 1



图5 不同 Re 下二次流强度随 Wi 的变化趋势Figure 5 Trend of secondary flow intensity with Wi under different Re

由图5可知,随着 Re 数的增大,管道内的二次流也相应地增强。随着魏森贝格数增大,二次流强度随之增大,在 Wi 约为 0.09 时达到峰值,之后又随着魏森贝格数的增大而减小。YUE^[12] 和 LI 等^{[5]62} 在对直管道的模拟探究中也观察到了这一点。其中 YUE 通过改变主流速来改变 Wi ,并且将这种现象归因于二次流的增加比主流速度增加得慢。为了排除这种影响,课题组与 LI 都采用了通过改变 λ 的方式来改变 Wi 。但即使提高 Wi 数,仍可实现 λ 与 S_v^* 之间的非单调关系。这意味着至少存在 2 个相互对立的效应,这些有竞争关系的效应主导了 λ 增大期间二次流的产生。针对这个现象 LI 做出如下推测:一方面,如果 λ 为零,则对应于牛顿流体,通过直管道的层流中就没有二次流;另一方面,如果 λ 为无穷大,对应于完全弹性或完全刚性材料,则不会有二次流产生。这种推测同样可以解释在文中弯管内所出现的这种现象。不同的是, λ 为零时弯管截面处仍然有二次流的产生,这主要靠离心力作用造成边壁流体与管中心流体的动量差。

2.3 曲率比 r_c 对二次流的影响

在 POOLE 等^{[6]12} 的研究中,选用了连续的半圆形弯道进行数值模拟,并且提出在松弛时间与逗留时间的比值较小时,前弯对后弯的影响比较小。课题组想要探究前弯对后弯的影响较大时,这种影响是否能够加强二次流强度以达到更强的掺混效果,连续的弯道是否能使二次流强度逐步增加或保持在较高的强度,以满足设计需求。

因此,在这种思路的指导下,课题组选用了类似的连续等曲率比管道。参数设置: Re 为 40, Wi 为 0.6, α 为 0.5, β 为 0.5。

曲率比对二次流的影响比较明显。如图6所示,当曲率比变大时,各个截面上的二次流强度都有所提升,曲率比越大,这种趋势愈发明显。

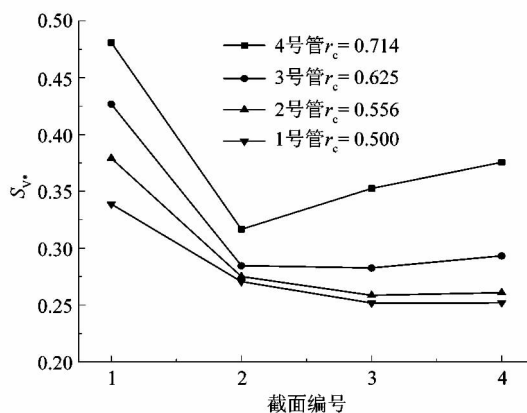


图6 不同曲率比弯道各截面二次流强度

Figure 6 Secondary flow intensity in each section of bend with different curvature ratio

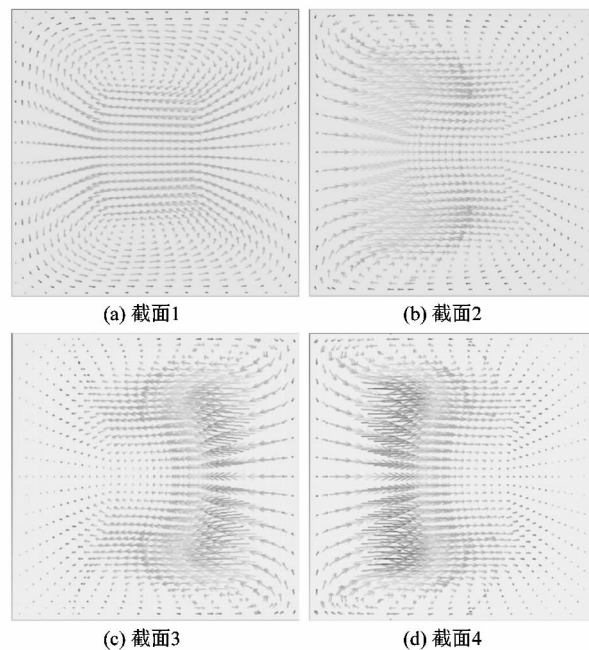


图7 4号管各截面二次流矢量图

Figure 1 Secondary flow vector diagram of each section of pipe 4

从图7的矢量图可发现,在经历多个弯道时,迪恩涡的涡心会朝着弯道的内侧移动,且相邻2个弯道的

迪恩涡的旋转方向相反。对比 1, 2, 3 和 4 号管道, 可以发现第 1 个弯道对第 2 个弯道的二次流强度起到了抑制作用, 而随着曲率比的增大, 其余 3 个弯道中, 前弯道对后弯道的二次流强度起到了积极作用。笔者认为在一定条件下, 特定的曲率比对二次流强度起到很好的强化作用, 如文中的 4 号管道。

2.4 弯道数量对二次流的影响

由上文可知当曲率比较大(4 号管道 $r_c = 0.714$) 时, 从第 2 个弯道起, 前弯道对后弯道的二次流强度都起到了积极作用。为了验证这个积极作用是否会一直持续下去, 课题组在 4 号管道的基础上再增加了 4 个弯道(共 8 个), 并命名为 5 号管, 同样在弯道中心处取截面, 参数的设置与 4 号管道一样, 如图 8 所示。

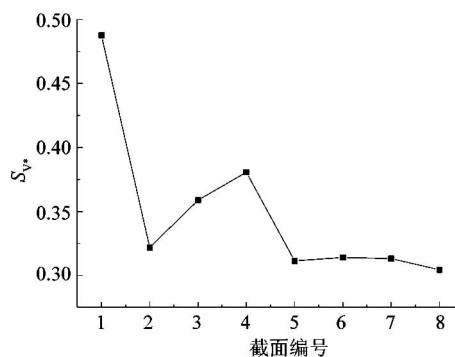


图 8 5 号管各截面二次流强度

Figure 8 Secondary flow intensity of each section of pipe 5

图 8 显示, 随着弯道数量的增加, 前弯道对后弯道的积极作用并没有持续下去, 这种积极的影响只延续到第 4 个弯道。而在之后的 4 个弯道中, 由于前弯的影响, 二次流的强度反而降低, 尤其是在第 5 个弯道, 二次流强度急剧下降。这说明在特定曲率比的弯管中, 存在一个最优的弯道数量值, 使管内的二次流强度达到最佳。本研究中的 4 号管, 其弯道数量的最优值是 4。

3 结论

管内的二次流效应可以加强管内对流和换热, 考虑到黏弹性流体与牛顿流体有着不一样的流动特性, 课题组对方形弯管中黏弹性流体的流动特性进行了研究, 探究黏弹性流体对弯管内二次流的影响。课题组

选取了不同曲率比以及不同弯道数量的管道进行模拟, 得到以下结论:

1) 随着流体黏度的增大, 管道截面径向主流速度也随着增大, 而靠近管道壁面的近壁流体速度基本不变, 从而增大了中心流体与近壁流体的动量差, 强化了二次流的产生。

2) 管内二次流强度先是随着 Wi 数增大而增大, 在 Wi 约为 0.09 时达到最大值, 之后随着 Wi 数增大而减小。笔者认为这是由于 2 种相互对立效应的影响: 即 λ 趋于 0 时, 对应于牛顿流体, 二次流的产生主要靠离心力作用造成边壁流体与管中心流体的动量差; λ 趋于无穷大时, 对应完全弹性或完全刚性材料, 不会产生二次流。

3) 曲率比对弯曲管道的二次流有很大影响, 曲率比越大, 即管道越弯曲, 其产生的二次流就越强。并且随着曲率比的增大, 管道前弯对后弯的影响也相应地变大。当曲率比增大到一定程度时, 管道的前弯对后弯的二次流起到积极作用。但这种积极作用不会一直延续下去, 当弯道数量达到一定值时, 前弯对后弯反而起到抑制作用。

参考文献:

- [1] 湛含辉, 朱辉. 螺旋管内迪恩涡运动的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2011, 26(1): 41-47.
- [2] DEAN W R. Fluid motion in a curved channel[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1928, 121(787): 402-420.
- [3] DEAN W R. Note on the motion of fluid in a curved pipe[J]. Philosophical Magazine: Series 7, 1927, 4(20): 208-223.
- [4] DATTA A K, HUMER Y, KOUCHI T, et al. Numerical study of turbulent helical pipe flow with comparison to the experimental results[J]. Journal of Fluids Engineering, 2017, 139(9): 091204.
- [5] LI Y K, ZHENG Z Y, ZHANG H N, et al. Numerical study on secondary flows of viscoelastic fluids in straight ducts Origin analysis and parametric effects[J]. Computers and Fluids, 2017, 152: 57-73.
- [6] POOLE R J, LINDNER A, ALVES M A. Viscoelastic secondary flows in serpentine channels[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2013, 201: 10-16.
- [7] SUN X Y, WANG S W, ZHAO M L. Viscoelastic flow in a curved duct with rectangular cross section over a wide range of dean number[J]. Physics of Fluids, 2021, 33(3): 033101.

(下转第 18 页)