

弯管内迪恩数对幂律流体二次流影响研究

许甜甜¹ 张浩^{1,2*} 王钰翔¹ 姚聚鹏¹

¹ 山东建筑大学热能工程学院

² 可再生能源建筑利用技术教育部重点实验室

摘 要 本文对 90°弯管中,处于完全湍流区($Re \geq 1.38 \times 10^4$)的牛顿流体与非牛顿幂律流体在不同的 Dean 数下的流动进行数值模拟。方程采用有限体积法进行离散,并采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行计算。模拟结果表明,迪恩数相同时,弯管流动中非牛顿幂律流体比牛顿流体更不易产生迪恩涡。迪恩数的大小对迪恩涡涡核的中心位置、流体速度分布都存在一定的影响,随着速度的不断增大,在弯管流动中 30°截面有可能会首先出现四涡流动。本文对弯管的二次流强度影响的研究对于工程应用和节能有一定的指导意义。

关键词 90°弯管 牛顿流体 非牛顿幂律流体 Dean 数 二次流

Study on the Influence of Dean Number on Secondary Flow of Newton Fluid and Power Law Fluid in 90° Bend Pipe

XU Tian-tian¹, ZHANG Hao^{1,2*}, WANG Yu-xiang¹, YAO Ju-peng¹

¹ School of Thermal Energy Engineering, Shandong Jianzhu University

² Key Laboratory of Renewable Energy Utilization Technologies in Buildings, Ministry of Education

Abstract: In the fully turbulent region ($Re \geq 1.38 \times 10^4$), this paper simulates the flow of the Newton fluid and the non-Newton power law fluid in the 90° bend pipe under different Dean numbers. The equations are discretized by finite volume method, and the RNG turbulence model is adopted to calculate. The results show that the non-Newtonian power law fluid in the pipe is more difficult to produce the Dean vortex than Newtonian fluid. The Dean number has a certain influence on the center position of the Dean Vortex core and the velocity distribution of the fluid. With the increase of velocity, it is likely to be a four vortex flow first at 30° cross section of the pipe flow. The research on the influence of secondary flow intensity of the bend pipe has a certain guiding significance for engineering application and energy saving.

Keywords: 90° bend pipe, Newton fluid, non-Newton power law fluid, Dean Number, secondary flow

0 引言

二次流是主流流动引起的一种伴随流动。在粘性流体的管流中,典型的二次流是管道在逐渐转弯时所形成的双螺旋现象^[1]。二次流(迪恩涡)的能量来自于主流,会因粘性作用转换为热量。这种伴随运动的强度通常比主流运动小得多,但是它在工程运用中的作

用却不容忽视,大量的研究表明二次流在强化传热传质、血液动力学、化工工程、环境除污工程等传输过程有明显的强化作用^[2]。在工业上,弯管的二次流强度分析对于工程应用和节约能源也有着重要的意义。

弯管中二次流现象最早是由 Thomson 观察到的^[3],之后 W. R. Dean 对弯管中充分流动的流体进行理论分析,确认一对反向旋转涡流作为弯管中二次流

收稿日期 2016-7-16

通讯作者 张浩(1977~),男,博士,副教授,山东建筑大学热能工程学院(济南 250101),E-mail: qdzhanghao@126.com

基金项目 山东省自然科学基金项目(No.ZR2014JL039)

的存在,并提出一个无量纲常数——迪恩数^[4]。朱辉、韩湛辉等人^[5]借助数值方法,在极坐标和笛卡尔坐标系下对迪恩涡运动进行了数学描述,在此基础上以长 500 mm、管径 50 mm 的 90°弯管为例,从径向速度、轴向速度和速度环量 3 个因素出发,在不同的迪恩数下对弯管中迪恩涡的运动规律进行数值模拟,并在不同的速度进口条件下,分析了速度峰值和迪恩涡核位置的运动规律。张晋凯、李根生等人^[6]以连续性方程和 N-S 方程为控制方程,对连续油管螺旋段牛顿流体流动进行数值模拟,研究螺旋段的流动特性及其摩阻压耗的变化规律。丁珏、翁培奋等人^[7]用 3 种湍流模式(标准 $k-\varepsilon$ 湍流模式、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模式、Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模式)模拟了方形截面 90°大曲率弯曲管道内的三维湍流流动,通过模拟结果与实验结果的对比,他们认为强曲率弯管的湍流数值模拟问题中, RNG $k-\varepsilon$ 湍流模式结合两层壁面模型的处理更合适。Md. Mainul Hoque 研究了在磁场作用中,利用不同方法对不同边界条件下的弯管流动进行数值模拟研究。研究表明,轴向速度随着曲率和磁场强度的增大而减小,随着迪恩数的增大而增大,并且涡的强度随着迪恩数或曲率半径的增大,从内部逐渐向外移动^[8]。

尽管有许多文献研究迪恩数对弯管流动影响,但是这些文献都是以牛顿流体作为流动介质,很少涉及非牛顿流体的流动。本文主要研究在 90°弯管内,不同工况下的 Dean 数对牛顿流体与幂律非牛顿流体二次流涡场的影响,分析牛顿流体与幂律流体在不同 Dean 数下二次流的变化形式和趋势以及本质区别。

1 数学模型

迪恩数 D_n 是弯管内流体流动的离心力和粘性力的比值,可用来衡量迪恩涡(二次流)的强度。迪恩数的表达式^[5-6]为:

$$D_n = \text{Re} \left(\frac{D}{R_c} \right)^{0.5} \quad (1)$$

式中:Re 为雷诺数, D 为弯管直径, R_c 为则弯管的曲率半径。

牛顿流体的雷诺数

$$\text{Re} = \frac{\nu D}{\gamma} = \frac{\rho \nu D}{\mu} \quad (2)$$

非牛顿幂律流体的雷诺数

$$\text{Re} = \frac{\rho \nu^{2-n} D}{k} \quad (3)$$

式中: ν 为主流速度, ρ 为流体的密度, n 为幂律指数;

μ 为流体稠度系数。

由迪恩公式可知,迪恩涡强度随着流体的流速、密度、管径的增大而增大,随着流体粘度和离心运动的曲率半径的增大而减小。

弯管中,对于定常密度和定常粘性的不可压缩流体,质量守恒和动量守恒控制方程^[10]如下:

质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (4)$$

动量守恒方程为:

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot (\lambda \nabla \cdot \vec{u}) + \nabla \cdot (2\mu S) + \rho \vec{f} \quad (5)$$

式中: λ 和 μ 均为粘性系数, S 为应力率张量, $s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, $\vec{f}$ 为单位体积上的质量力。

由于迪恩涡存在旋流流动,因此利用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型可能无法得到理想的计算结果。本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型是针对充分发展的湍流,通过修正湍动粘度,考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况,可以更好的处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动。RNG $k-\varepsilon$ 方程的湍动能传输方程可表示为^[10]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

式中: $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$, $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, 其中 $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$, $C_\mu = 1.42$, G_k 是由平均速度梯度而产生的湍流动能, $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 均为常量, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - (\eta(1-\eta/\eta_0))/(1+\beta\eta^3)$, 其中 $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$, $E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, $\eta_0 = 4.377$, $\beta = 0.012$ 。

2 物理模型及边值条件

模拟对象为半径 r 为 50 mm,曲率半径 R_c 为 100 mm 的弯管。考虑到管内流体的充分发展,弯管入口前取 10D 长度的直管段,弯管出口取 5D 得直管段,分别模拟非牛顿流体和牛顿流体在管内的二次流形成与发展趋势。在弯管段取 5 个观测面,分别为 0°截面(进口截面)、30°截面、45°截面、60°截面、90°截面(出口截面),观测截面的二次流涡旋情况。弯管模型如图 1 所示。弯管模型采用 ICEM 绘制网格,并采用边界层加密的方法对网格进行优化,用 ANSYS CFX 软件对弯管模型进行数值计算和后处理。

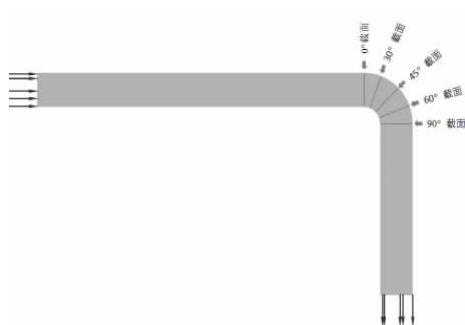


图 1 90°弯管模型图

弯管上游进口边界设置为速度进口边界,弯管下游出口边界设置为自由出流,并认为流体在转弯之前是充分发展的,管壁边界设置为无滑移固壁边界,并在靠近壁面处设置边界层,对网格进行加密处理。如图 2 所示。

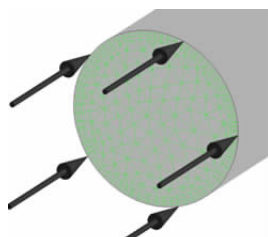


图 2 90°弯管模型网格划分图

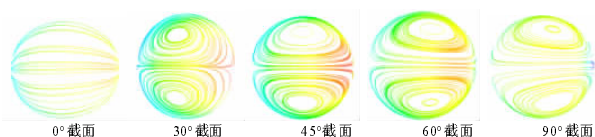
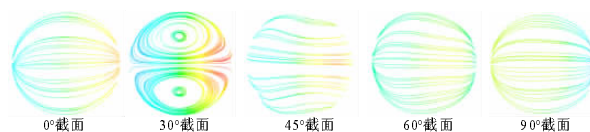
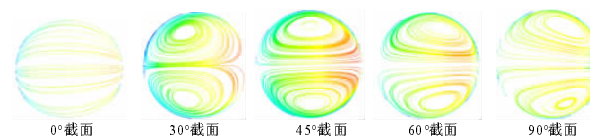
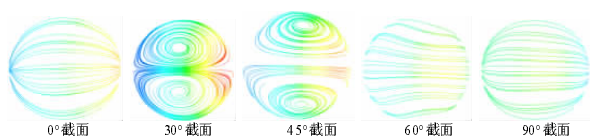
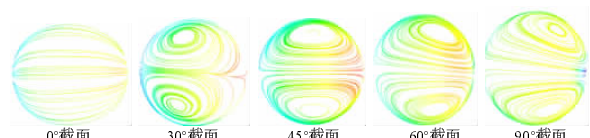
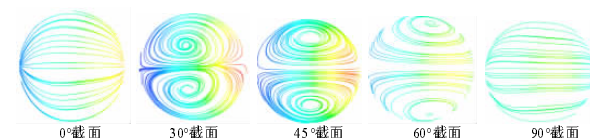
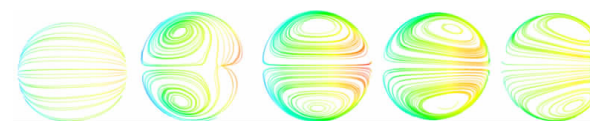
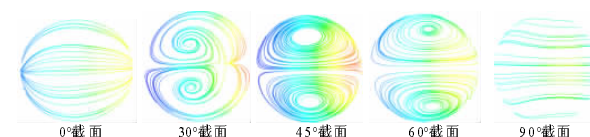
本文模拟的工况是在完全湍流区 ($Re \geq 1.38 \times 10^4$) 牛顿流体与非牛顿幂律流体在相同的迪恩数下,二次流涡流的形成情况对比。模拟工况条件如表 1。

表 1 四种模拟工况

工况	水的速度值 $v_1 / \text{m/s}$	非牛顿幂律流体速度值 $v_2 / \text{m/s}$
$D_n = 3.98 \times 10^{-4}$	0.2	14.1
$D_n = 4.98 \times 10^{-4}$	0.5	22.3
$D_n = 9.95 \times 10^{-4}$	1	31.5
$D_n = 3.98 \times 10^{-5}$	2	44.6

3 模拟结果

本文模拟了 $\phi 100$ 的90°弯管中,牛顿流体(以水为例)与非牛顿幂律流体迪恩涡的形成过程,并对两者的速度分布进行对比分析(图 3~10)。

图 3 弯管内不同截面流线图 (水, $D_n=3.98 \times 10^4$)图 4 弯管内不同截面流线图
(非牛顿幂律流体 $D_n=3.98 \times 10^4$)图 5 弯管内不同截面流线图 (水 $D_n=4.98 \times 10^4$)图 6 弯管内不同截面流线图
(非牛顿幂律流体, $D_n=4.98 \times 10^4$)图 7 弯管内不同截面流线图 (水 $D_n=9.95 \times 10^4$)图 8 弯管内不同截面流线图
(非牛顿幂律流体, $D_n=9.95 \times 10^4$)图 9 弯管内不同截面流线图 (水, $D_n=3.98 \times 10^5$)图 10 弯管内不同截面流线图
(非牛顿幂律流体, $D_n=3.98 \times 10^5$)

对于牛顿流体,通过图 1、图 3、图 5、图 7 和图 9 可以看出,在 0°截面(进口截面)出现并初步形成迪恩

涡的趋势,在 45° 截面,形成位于中心位置的一对双旋流,且不产生偏移。当 $D_n=3.98 \times 10^4$ ($v_1=2$ m/s) 时, 30° 截面、 60° 截面和 90° 截面(出口截面)迪恩涡中心距的偏移不是非常明显。 $D_n=3.98 \times 10^5$ ($v_1=2$ m/s) 时,这三个截面的迪恩涡中心距偏移量都是最大的,即 30° 截面、 60° 截面和 90° 截面迪恩涡中心距的偏移量随着迪恩数的增大(速度增大)而增大。

对于非牛顿幂律流体,通过图 2、图 4、图 6、图 8 和图 10 可以看出,随着迪恩数的增大,各截面的迪恩涡中心位置变化不大。当 $D_n=3.98 \times 10^4$ 时,只有 30° 截面形成迪恩涡,其他各截面都没有形成,当 $D_n=4.98 \times 10^4$ 时,只在 30° 截面和 45° 截面形成迪恩涡,当 $D_n=9.95 \times 10^4$, $D_n=3.98 \times 10^5$ 时,在 30° 截面、 45° 截面和 60° 截面形成迪恩涡。所以随着迪恩数的增大,出现迪恩涡的截面也逐渐增多。

通过图 2 和图 4 可以看出,对于牛顿流体(水), 30° 截面、 45° 截面、 60° 截面和 90° 截面都已形成迪恩涡,而对于非牛顿幂律流体,只在 30° 截面形成迪恩涡。所以相同速度时,非牛顿幂律流体比牛顿流体更不易产生迪恩涡,且靠近进口端弯管截面更易形成迪恩涡。

从图 9 和图 10 中可以看出,牛顿流体(水)和非牛顿幂律流体在弯管内流速最大值都出现在弯管内侧。随着速度的增大,在 30° 截面有可能会首先出现四涡流动。

5 结论

1) 对于牛顿流体,在 0° 截面(进口截面)出现初步形成迪恩涡的趋势。在 45° 截面,形成位于中心位置的一对双旋流,且不产生偏移。 30° 截面、 60° 截面和 90° 截面迪恩涡中心距的偏移量随着迪恩数的增大(速度增大)而增大。

2) 对于非牛顿幂律流体,出现迪恩涡的各截面中心位置偏移现象不明显。

3) 迪恩数相同时,弯管流动中非牛顿幂律流体比牛顿流体更不易产生迪恩涡,且靠近进口端的弯管截面更易形成迪恩涡。

4) 弯管流动中,流速最大值出现在弯管内侧。随着速度的不断增大,在弯管流动中 30° 截面有可能会首先出现四涡流动。

致谢

本文得到山东省自然科学基金项目(No.

ZR2014JL039)资助,在此表示感谢!

参考文献

- [1] 湛含辉,成浩,刘建文. 二次流原理[M]. 长沙:中南大学出版社, 2006
- [2] 郭小勇,赵创要. 螺旋管中二次流强度的数值研究[J]. 甘肃科学学报, 2011, 23(3): 87-92
- [3] J Thomson. On the origin of winding of rivers in alluvial plains, with remarks on the flow of water round bends in pipes[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1876, 25:5-8
- [4] W R Dean, J M Hurst. Note on the motion of fluid in a curved pipe[J]. Mathematika, 1959, 6(1): 77-85
- [5] 朱辉,湛含辉.迪恩涡运动规律的数值研究[J].湖南工业大学学报, 2009, 29(3): 58-62.
- [6] 张晋凯,李根生.连续油管螺旋段摩阻压耗数值模拟[J].中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(2): 115-119.
- [7] 丁珏,翁培奋. 三种湍流模式数值模拟直角弯管内三维分离流动的比较[J]. 计算物理, 2003, 20(5): 386-390
- [8] Mainul Hoque, Mahmud Alam. Effects of Dean number and curvature on fluid flow through a curved pipe with magnetic field [J]. Procedia Engineering, 2013, 56: 245-253
- [9] Mainul Hoque, Mahmud Alam. Numerical simulation of Dean number and curvature effects on magnetobiofluid flow through a curved conduit[J]. Journal of Engineering in Medicine, 2013, 227: 1155-1170
- [10] 王福金. 计算流体动力学分析 -CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社, 2004

(上接 20 页)

小井控制在 44 ± 0.2 $^\circ\text{C}$ 的范围内,从而获得了温度比较恒定的送风,成功印证了通过 PI 控制器的控制,能够减少空气换热器空气出口温度的波动并使波动控制在一定范围内。

参考文献

- [1] 赵荣义. 简明空调设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1998.
- [2] 丁国良,张春路. 制冷空调装置仿真与优化[M].北京:科学出版社, 2003.
- [3] Wang C C, Chang C T. Heat and mass transfer for plate fin-and-tube heat exchangers, with and without hydrophilic coating[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1998, 41(20): 3109-3120.
- [4] 黎明安. Matlab/Simulink 动力学系统建模与仿真[M]. 北京:国防工业出版社, 2012.
- [5] 许丽佳. 自动控制原理[M]. 北京:北京大学出版社, 2013.
- [6] 樊德玺,蓝政杰. 空气换热器的数学建模与 Simulink 仿真测试[J]. 建筑热能通风空调, 2009, 28(5): 22-25.