

文章编号: 2095—0411 (2011) 02—0036—04

90°弯管管道螺旋流的数值模拟^{*}

翟银平^{1,2}, 王树立¹

(1. 常州大学 江苏省油气储运技术重点实验室, 江苏 常州 213016; 2. 中国石化管道储运分公司, 江苏 徐州, 221008)

摘要: 利用计算流体力学软件 Fluent 对 90°弯管中的管道螺旋流进行模拟, 通过建模和数值计算, 研究了弯管中螺旋流的生成、发展和衰减规律。结果表明切向进流角度 60°时切向流速最大, 这有利于清除弯管中的沉积杂质, 同时证明弯管有很好的继旋作用。

关键词: 螺旋流; 90°弯管; 进流角度; 切向速度

中图分类号: TE 832

文献标识码: A

Numerical Simulation of the Spiral Flow in the 90° Bend Pipe Based on Fluent

ZHAI Yin—ping^{1,2}, WANG Shu—li¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology, Changzhou University, Changzhou 213016, China; 2. SINOPEC Pipeline Storage and Transportation Company, Xuzhou 221008, China)

Abstracts: The spiral flow was simulated in the 90° bend pipe by using CFD software Fluent. Through the modeling and numerical calculation, it displayed the formation, development and attenuation of spiral flow. The results showed that when the angle of inlet was 60°, the tangential velocity was the highest, which was beneficial for removing sedimentary impurities in bend pipe, which also showed that bend pipe worked well for flow convection.

Key words: spiral flow; 90° bend pipe; inflow angle; tangential velocity

螺旋流是指同时存在轴向、径向及切向速度分量的一种特殊流动, 其中切向速度的存在可以使固粒悬浮在流场中, 达到传质、掺混的作用。螺旋流在工业方面的应用范围很广, 如射流技术、燃烧技术、气力输送、旋风分离及涡管排沙等。在燃烧器中利用螺旋流可以稳定火焰同时强化燃料和空气的混合来加强热量和质量的交换, 这样可以使燃料充分燃烧以达到节能的目的。此外龙卷风也是自然界

中常见的一种螺旋流现象^[1]。

一般来说, 螺旋流的产生方法有 3 种: 切向进流、安装导流片以及旋转管道^[2]。对于旋转管道中的螺旋流, 西安交通大学对立式和卧式螺旋管内气液两相流研究比较全面, 特别是对螺旋管流的流型做了大量的研究, 并建立了流型图^[3]。在涡管排沙方面, 石河子农学院的张开泉从能量角度解释了螺旋流具有强大输沙能力的原因^[4]。太原理工大学的

^{*} 收稿日期: 2010—12—08

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (51046001)

作者简介: 翟银平 (1984—), 女, 湖南常德人, 硕士生。

兰雅梅等对带有局部起旋器的圆管螺旋流进行了数值模拟,并用实验验证了模拟结果^[5]。张洪军等采用激光多普勒测速仪对方形截面 90°弯管内的气固两相流动进行了测量,并对单相气体流动和气粒流中的气相流动进行了具体分析^[6]。而 K. Mo-hanarangam 等运用了欧拉模型模拟了方形截面 90°弯管内的气固两相流,由此验证了激光多普勒测速仪对其的测量结果^[7]。对弯管处的淤积问题很少有人涉及,故本文采用切向进流及 90°弯管对螺旋流进行数值模拟。

1 管道几何模型及数值方法

为了研究弯管内螺旋流产生后的流动规律,本文使用计算流体力学软件 FLUENT 进行数值模拟,图 1 是 CFD 的具体计算流程,采用了标准 $k-\epsilon$ 模型作为湍流模型,并采用稳态、显式求解方法,以便较快得到收敛的结果,用 SIMPLE 算法求解速度和压力的耦合关系,动量、能量、湍动能和耗散率的离散格式均取一阶迎风差分格式,壁面附近采用标准壁面函数方法处理^[8]。

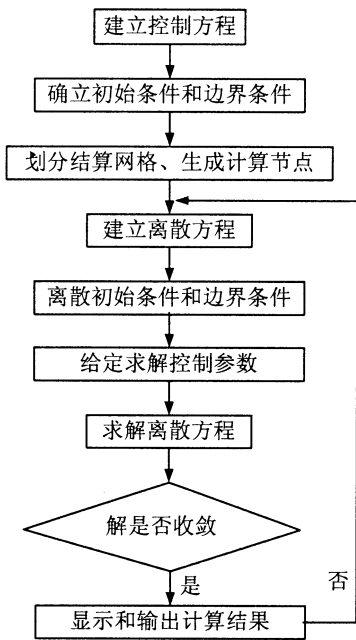


图 1 CFD 计算流程图

Fig. 1 Calculation process chart by CFD

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \\ \frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \\ \frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{w} \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \end{cases} \quad (2)$$

标准 $k-\epsilon$ 模型中湍动能 k 和耗散率 ϵ , 与之相对应的输运方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m + S_k \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - \\ C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned} \quad (4)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

在式 (1) 至 (5) 中, ρ 是密度, t 是时间, \mathbf{u} 是速度矢量, u, v, w 是速度矢量在 x, y, z 方向的分量。在式 (2) 中, S_u, S_v 和 S_w 是动量守恒方程的广义源项。式 (3)、(4)、(5) 中, G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项, 模型常数 $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ 的取值分别为: 1.44、1.92、0.09、1.0、1.3。

1.1 管道模型的建立

在 FLUENT 的前处理软件 GAMBIT 中, 对管道模型建模。首先在笛卡尔坐标系中建立弯管 3 维模型, 管径为 0.1m, 弯管段的弧半径为 1m, 对应的中心角为 90°, 直管段的长度为 1m。网格质量对 CFD 计算精度和效率有着重要的影响, 本文采用结构化、六面体网格, 以便快速得到正确的模拟结果。在划分网格时, 首先在入口端面划分边界层, 对壁面网格进行加密, 再划分面网格, 间隔尺寸 0.15, 最后划分体网格, 间隔尺寸 0.5, 如图 2 所示。

1.2 边界条件的设置

管壁内表面: 在管道内壁面上, 对速度、压力使用无滑移边界条件, 将 k, ϵ 设为零。弯管入口:

定义弯管端面为速度入口，在管道入口处就相当于安装了一个起旋器，所以直接给出 x 、 y 、 z 3 个方向的速度即可。本算例受温度的影响较小，故并不在入口指定温度条件。出口：定义 z 直管端面为自由流出，不指定边界条件。近壁区域：在壁面附近的网格点上，平行与壁面的速度和紊流动能由对数函数确定。

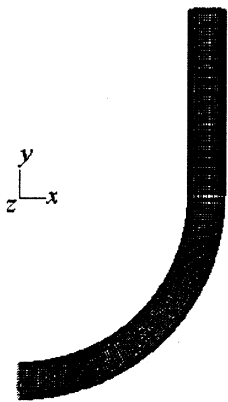


图 2 网格模型图
Fig. 2 Grid model chart

2 算例及结果分析

本算例采用 6 组数据进行模拟，为方便模拟，每组的速度入口 x 、 y 方向速度保持不变，定义为 1 m/s； z 方向的速度取决于 y 方向的速度，夹角分别取 20°、30°、40°、50°、60°、70°。其中 V_z 可由式 (6) 计算：

$$V_z = V_y \times \tan\theta \tag{6}$$

在切向进流角度 θ 取 20° 时， $V_z = 1 \times \tan 20^\circ = 0.364 \text{ m/s}$ 。

2.1 速度入口角度对流场的影响

在运用 FLUENT 软件对流场进行模拟时，得到了弯管管道螺旋流的速度场和后处理的相关图表。图 3 是 $\theta = 20^\circ$ 时的螺旋流流场速度分布图。图中反映了弯管内螺旋流的产生、发展、衰减的变化过程，在靠近壁面的流体层中，离心力的作用使得流体的湍流混合加强，有利清除管内淤积的杂质。

螺旋流的速度可以分解为径向速度、切向速度和轴向速度 3 部分，其中径向速度与切向速度和轴向速度相比，绝对值很小，接近于零，可以忽略不计。轴向速度主要用于运输流体介质；切向速度与轴向速度相比数值较大，在清除水中的沉积物时，切向速度能避免沉积物沉入管道底部，使螺旋流排污清淤成为可能。故本文主要讨论弯管中螺旋流的

切向速度。切向速度形成的主要原因是在入口截面由于切向进流的作用，近壁区的水流旋转起来，并经由水流的粘性作用由管壁处沿径向向管中心传递，并且沿管长方向，受惯性作用向下游传递。图 4 表示了速度入口角度不同时，流场出口截面沿管内直径方向变化的规律，把弯管内侧壁定义为坐标轴的原点。由图 4 可知，速度入口角度增大，切向速度随之增大；但是在达到某一角度之后，继续增大入口角度，出口处的切向速度反而减小，螺旋强度也会相应减小；切向进流角度为 60° 时的切向流速是最大的，这对清除水中的沉积杂质是很有利的。从图 4 中还可以得知切向速度分布沿管径方向有从低到高，再由高到低变化的趋势，在弯管内外侧附近达到一个较大的峰值。这样能够避免杂质和沉积物沉淀在弯管道内壁，保证管道通畅。

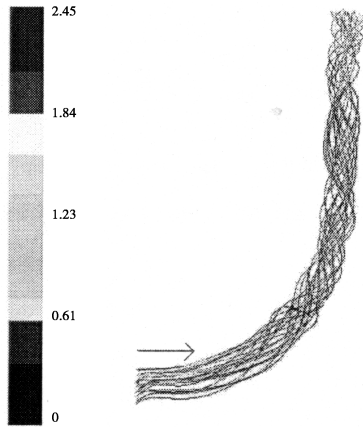


图 3 入口速度切向角度 20° 时的流场速度分布图
Fig. 3 The flow velocity distribution when the tangential velocity—inlet angle is 20°

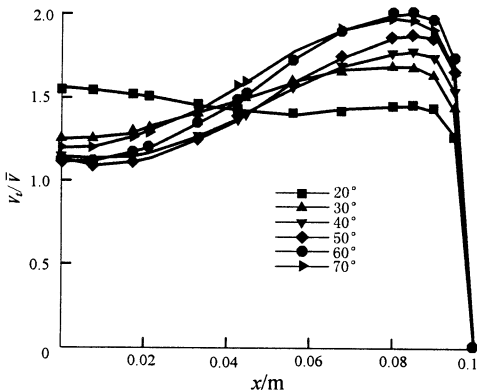


图 4 不同入口角度出口截面的切向速度对比
Fig. 4 The tangential velocity comparison chart of exit section under different inlet angles

图 5 是不同速度入口角度条件下弯管出口截面的速度涡量图，可以看到入口角度为 20°—40° 时的速度较小，且分布较无规律；入口角度 50°—70° 时

的速度较大, 且靠近管内壁处速度比管道截面中心处大, 这样有利于清除近壁面的沉积物; 特别是入口角度 60°时涡旋速度呈中心对称分布, 这样可以保证水流在前进时的切向流速能够保持一定的稳定性, 有利于减少能耗和管道维护成本。

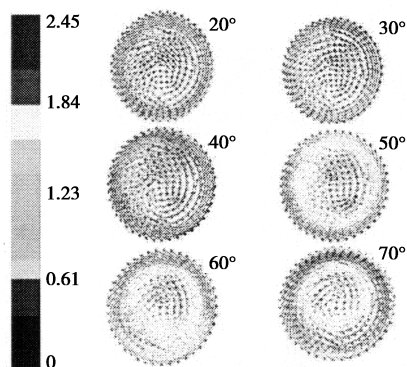


图 5 不同入口角度出口截面的速度涡量

Fig. 5 The velocity—vorticity chart of exit section under different inlet angles

2.2 螺旋流的形成和发展

圆管螺旋流的产生主要有 3 种方法: 切向进流、安装导流片以及旋转管道。为了在圆管中产生螺旋流, 可以在圆管中设置起旋器, 起旋器是由若干片导流叶片组成的导水机构, 可以有效地产生螺旋流; 但是螺旋流在形成以后, 若没有保持螺旋流的设施, 由于流体与固壁之间的摩擦和流体分子之间的剧烈运动造成的能量损耗, 螺旋流会发生衰减。为了维持螺旋流, 采用继旋器来强化衰减后的弱螺旋流以达到排污清淤的目的。但在本文中, 切向进流不是单一的螺旋流起旋方法, 90°的弯管也是产生螺旋流的因素之一。从图 3 中得出经过弯管后螺旋流流速比入口段流速大, 这说明弯管能很好的继旋。选出 6 组模拟算例中螺旋流效果最好的一组进行螺旋流流场切向速度分析, 图 6 是入口流速角度 60°时, 直管段处各个断面切向流速沿圆管横截面直径方向分布的对比图, 从图 6 中可知, 在弯管后半段流场的切向速度并没有随着流体的流动迅速衰减。相反, 沿着流体流动方向切向流速在弯管内壁的外侧处切向流速有增大的趋势。这说明弯管能很好地促进螺旋流的生成, 从而有效地继旋。

3 结论

①切向进流时流速方向角在 50°—60°之间时,

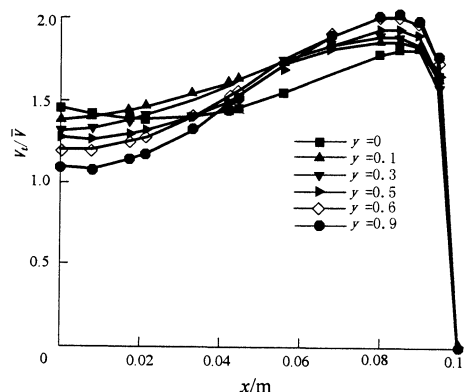


图 6 入口角度 60°时各个截面的切向速度对比图

Fig. 6 The tangential velocity comparison chart of different sections under inlet angles of 60°

产生的螺旋流具有比较合适的切向速度, 有利于清除弯管内的沉积杂质。②螺旋流的旋流运动很容易因管壁的摩擦而衰减, 利用 90°弯管的继旋作用能很好地维持螺旋流。③直管段处螺旋流切向速度分布呈中心对称分布, 从管道中心向四周管壁递增; 但由于离心力和壁面摩擦力的影响, 90°弯管内螺旋流的切向速度并不完全以管道横截面圆心为对称中心, 最大速度靠近弯管内壁外侧, 这样可以有效避免杂质沉积在弯管段。

参考文献:

- [1] 熊鳌魁, 魏庆鼎. 轴对称螺旋流解析解的探讨 [J]. 力学与实践, 1999, 21 (5): 15—16.
- [2] 熊鳌魁, 魏庆鼎. 一种强螺旋流现象的数值试验研究 [J]. 空气动力学报, 2001, 19 (1): 83—90.
- [3] 林宗虎, 王树众, 王栋. 气液两相流和沸腾传热 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003: 36—37.
- [4] 张开泉, 刘焕芳. 涡管螺旋流排沙的研究与实践 [J]. 水利水电技术, 1991 (11): 48—54.
- [5] 兰雅梅, 孙西欢, 霍德敏. 圆管螺旋流的三维数值模拟 [J]. 太原理工大学学报, 2001, 32 (3): 255—259.
- [6] 张洪军, 赵周林, YANG William, 等. 90°弯管内气固两相流湍流变动实验研究 [J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2010, 25 (4): 559—565.
- [7] Mohanaragam K, Tian Z F, Tu J Y. Numerical simulation of turbulent gas—particle flow in a 90° bend: Eulerian—eulerian approach [J]. Computers & Chemical Engineering, 2008, 32 (3): 561—571.
- [8] 王福军. 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: 7—13, 121—122.