

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.02.007

S弯内稀相气固两相流动数值研究

陈卫民¹, 袁国安^{1,2}, 肖双双³

(1. 南华大学 城市建设学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 衡阳三力高科技开发公司, 湖南 衡阳 421001;
3. 南华大学 船山学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要:通过使用 Fluent 软件的 Realizable κ - ε 湍流模型,对 S 弯内稀相气固两相流动特性进行三维数值模拟,并采用定性分析的方法分析了固体颗粒对管道侵蚀的规律。结果表明:在 S 弯上游管段,管道内侧压力小速度大,管道外侧压力大速度小;而在速度和压力的分布在 S 弯下游管段则与之相反。根据体积分数与冲刷大小的关系,可以确定 $\varphi=0^\circ$ 截面的外侧和 $\varphi=90^\circ$ 截面的内侧颗粒对管道的侵蚀最严重。

关键词:气固两相流;S 弯;数值模拟;双流体模型;磨损

中图分类号:O357.5 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2014)02-0024-04

Stimulation Research of Gas-Solid Two-Phase Flow in an S-Bend

CHEN Weimin¹, YUAN Guoan^{1,2}, XIAO Shuangshuang³

(1. School of Urban Construction, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

2. Hengyang Sunny High-Tech R&D Company, Hengyang, Hunan 421001, China;

3. Wang Chuanshan College, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: The Realizable κ - ε models were used to simulate flow behavior of dilute-phase gas-solid two-phase flow in a 3D S-bend numerically and the influence of erosion in this section was evaluated qualitatively. The results show that the pressure inside of pipe is higher than the outside of pipe while the speed of two phases inside of pipe is lower than outside of pipe in the upstream piping. The distribution rule of pressure and flow velocity in downstream piping is against to the upstream piping. It can conclude that the greatest erosion emerges in the section of $\varphi=0^\circ$ and $\varphi=90^\circ$.

Key words: gas-solid two-phase flow; S-bend; numerical stimulation; two-fluid model; erosion

气力输送技术在卷烟工业中的运用提高了烟丝生产自动化程度和输送效率,同时也降低了生产过程中对环境的污染。在卷烟厂烟丝气力输送系统设置弯曲管道从而使得系统管线布置灵活并且占地面积较小,但是对于弯管和风机的叶轮等都存在严重的动力损失和磨损问题。弯曲管道是这些设备之中的典型,是最便利及最具典型意义的实验设备。

国内外研究人员针对弯管内气固两相流动特性及固相对壁面的侵蚀作了大量的研究,采用的方法主要包括 LDV 技术测量及数值计算方法。Taylor 等^[1]使用多普勒测速仪分析 90° 方形弯管在层流和紊流两种状态下的速度分布,并得出了弯管壁面的压力分布。Kliafas 和 Holt^[2]应用 LDV 技术测试出了 90° 方形弯管

内气固两相流流动特性,并得到气相和固相在流场内各点上的速度场。史峰等^[3]用标准 κ - ε 双方程模型对大曲率、小高度比弯管内湍流进行计算,并与实验测试数据对比,发现在 45° 截面前计算结果与实测数据有很高的一致性。丁钰和翁培奋^[4]利用 RNG κ - ε 湍流模型计算 90° 弯曲管道内流体的流动特性,分析了不同来流攻角和来流侧滑角下流体介质的流动特性。樊洪明等^[5]应用大涡模拟方法对方形弯管内流体流动进行分析指出具有适当计算格式的大涡模拟湍流模型适用于弯曲管段的湍流流动特性计算。张洪军等^[6]使用相位多普勒测速仪(PDA)分别对 90° 弯管内单相气体流动和气固两相流进行了测试研究,实验结果发现由于颗粒的拖拽使得气相速度落后于单相气流。周

收稿日期:2013-10-16;修回日期:2013-12-12

基金项目:湖南省高校产业化培育项目(12CY011)

作者简介:陈卫民(1988),男,江西瑞金人,硕士研究生,主要研究方向为流体工程技术与节能。E-mail:945545252@qq.com

艳荣等^[7]应用流体力学软件 Phoenix 对 90°弯管内气固两相流的速度场和压力场进行数值模拟,结果指出气流分布不均造成弯管磨损的主要原因之一。章本照等^[8]利用数值方法分析了弯管曲率、安装方式及颗粒尺寸对弯管壁面磨损的影响。

S 弯是由两个 90°弯管组成的连接构件,广泛运用于卷烟厂烟丝气力输送系统中,而有关 S 弯内流体流动特性及颗粒对管道的侵蚀等方面的资料相对较少,因此研究 S 弯内气固两相流动的相关特性具有重要的工程意义。文中拟采用基于 Euler 法的双流体模型对 S 弯内的气固两相流动进行分析计算,旨在获取最佳的流动参数并为烟丝气力输送优化设计提供数值试验方法。

1 气固两相流数值方法

在欧拉双流体模型中,不同的相被处理成相互贯穿的连续介质,流体中任一点同时被两种组元所占据,因此引入相体积率的概念。在烟丝气力输送过程中,由于 ϕ 远远小于 1 (ϕ 为固体相体积率),流体相取与载粒气流相同的物性参数。欧拉双流体模型主要的控制方程有:气体相和固体相连续性方程、动量方程,固体相混合紊流模型的 κ 和 ε 方程。

1.1 控制方程

1) 质量方程

$$\text{气相} \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\text{固相} \quad \frac{\partial \bar{\rho}_p v_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{\rho'_p v'_j}$$

式中 $\bar{\rho}_p = \phi \rho_s$, 为单位体积混合流体中烟丝质量, ρ_s 为烟丝颗粒的密度。

2) 动量方程

$$\text{气相} \quad \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + (\mu + \mu_t) \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u'_i u'_j} + \bar{F}_{pi}$$

$$\text{固相} \quad \bar{\rho}_p v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = - \overline{\rho'_p v'_j} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho}_p \overline{v'_i v'_j}) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{v_j \rho'_p v'_j}) - \bar{F}_{pi} + \bar{F}_g$$

式中 $\bar{F}_{pi} = \frac{\bar{\rho}_p (v_i - \mu_i)}{t^*}$, t^* 为颗粒响应特征时间尺

度; $\bar{F}_g$ 是颗粒项重力源项; μ_t 为流体涡黏性系数, $\mu_t = \frac{C_\mu \rho \kappa^2}{\varepsilon}$; C_μ 为常数,下同。

1.2 Realizable κ - ε 湍流模型

κ 方程

$$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa - \rho \varepsilon$$

ε 方程

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{\kappa + \sqrt{v \varepsilon}}$$

其中, $\sigma_\kappa = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$, $C_2 = 1.9$, $C_1 = \max\left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right)$, $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{\kappa}{\varepsilon}$, $E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ 。

2 物理模型及网格

S 弯根据其在系统中的设置方式分为 3 种,即上行 S 弯、下行 S 弯和水平 S 弯。上行 S 弯如图 1(a) 所示,弯管直径 $D = 133 \text{ mm}$,上游和下游支管段长度 $L = 5D$ 。弯管中心线半径 R 与管道直径 D 之比等于 8,流体介质为空气,进口平均流量为 $1000 \text{ m}^3/\text{h}$,相应雷诺数为 182 100;固相为烟丝,密度为 1042 kg/m^3 ,烟丝平均直径为 $130 \text{ }\mu\text{m}$,占气相体积分数为 0.001。计算区域及网格如图 1(b) 所示,网格采用 cooper 方法进行划分,弯曲管段局部加密,节点和面的数量分别为 14 632 和 37 885。

3 边界条件

给定速度入口边界条件,气相和固相速度均为 20 m/s ,固体相体积分数为 10^{-3} ,湍动能及流动耗散率可通过计算得出。壁面处对流体相采用壁面函数法和无滑移边界条件,颗粒相在壁面处不满足无滑移条件^[9]。压力出口给定静压为 0,并给定湍流强度和水力半径分布为 4% 和圆管直径 D 。

忽略颗粒间的相互碰撞,但考虑流体与颗粒间的相互作用引起的相间双向耦合作用。除考虑重力作用外忽略由颗粒周围流体压力梯度产生的力、Magnus 力、黏性剪切力及其他外力。颗粒对管道的磨损采用定性分析,计算时只考虑颗粒与壁面之间的一次碰撞^[10]。

4 计算结果分析

4.1 流场分析

图 2 给出了 S 弯中心截面处的压力分布云图。为方便分析规定管道中心面以上为 S 弯内侧,中心面以下为外侧。由图 2 可知,在上游管段,弯管外侧压力高

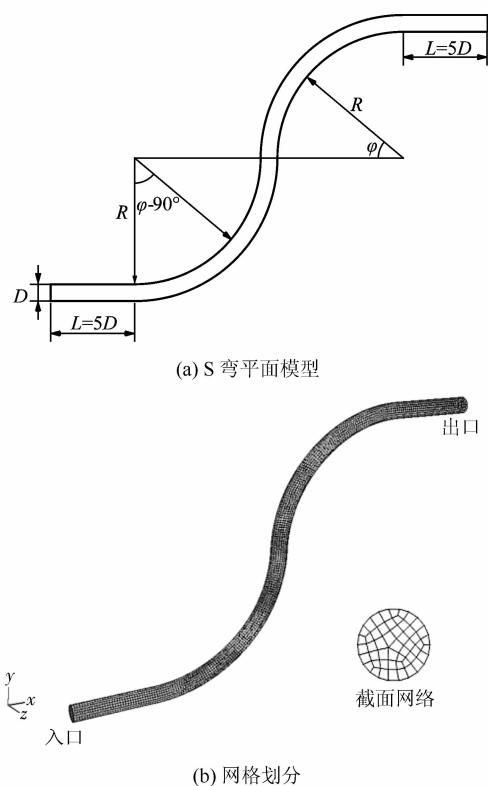


图1 S弯物理模型及网格

Figure 1 Physical model and mesh of S-bend

于内侧压力,沿着流动方向上内外侧压力均有不同程度的减小,外侧高压区面积随着气流前行不断减小而低压区面积则在增大。在S弯喉部位置内外侧压力基本上相等,同时说明喉部的气流较稳定。在下游管段,由于流动方向的改变引起弯管外侧的压力比内侧的压力低,外侧低压面积沿着流动不断增大,相对地,内侧高压面积则沿着流动方向不断减小。

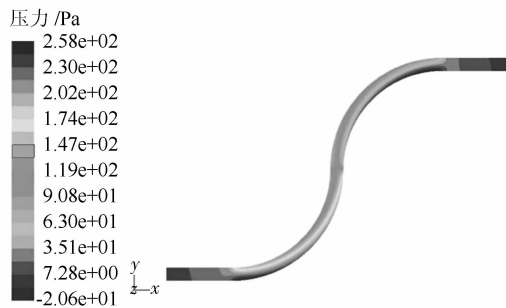


图2 中心轴面压力云图

Figure 2 Pressure contours in central axial plane

图3和图4分别给出了中心截面处气、固两相的速度矢量分布图。由图3可知,沿着气流流动方向气相速度在高压区比低压区小。气相进入弯管后由于惯性的作用大量固体颗粒被冲向管道外侧使得外侧气流

速度下降,而在内侧只有少量的固体颗粒阻碍气相运动因此其速度较外侧大。在即将进入喉部位置($-50^\circ < \varphi < 0^\circ$)时,管道中心有一块面积的近似均匀流速区,此管段中心流速大于内外两侧流速。在下游管段,外侧气相流速沿着混合气流方向不断增大,内侧气相流速则有小幅度的下降。图4所表示的结果与图3基本一致,说明气相与固相流动具有很大的 consistency。

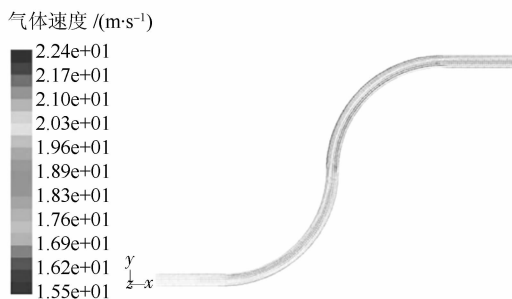


图3 中心轴面气相速度

Figure 3 Gas velocity in central axial plane

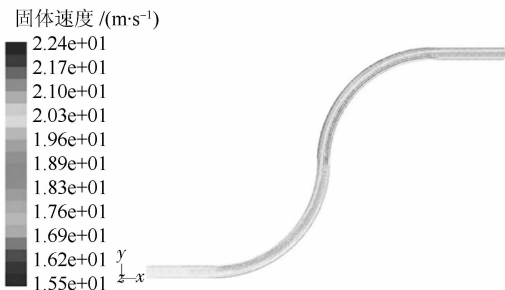


图4 中心轴面固相速度

Figure 4 Particles velocity in central axial plane

4.2 磨损定性分析

文中根据磨损量与颗粒相体积率的正比关系定性分析最大磨损出现的规律及位置。图5给出了 $\varphi = -60^\circ, -45^\circ, -30^\circ, 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 截面处烟丝颗粒所占的体积分数。混合气流进入S弯后随着管道路线改变,管内粒子在气流中的分布越来越不均匀,同时由于惯性的作用使得颗粒往弯管外侧集中。当 $\varphi = -60^\circ$ 时,管道内颗粒体积分数由内侧向外侧逐渐增大,颗粒与外侧壁的磨损也在增大。当 $\varphi = 0^\circ$ 时,弯管外侧颗粒浓度达到最大值同时出现大面积的无粒子区域,此处也是磨损最大的部位。随着 φ 进一步增大,气流流动方向由垂直转向水平的过程,S弯上下两侧颗粒浓度在不断上升,同时也在上下两侧也出现了较大的磨损。由图5(e)和图5(f)可知,当 φ 由 30° 增大到 45° 时,内侧及上下两侧粒子浓度在不断增大,相反的外侧粒子浓度则下降。 $45^\circ < \varphi < 60^\circ$ 时,管道中心处粒

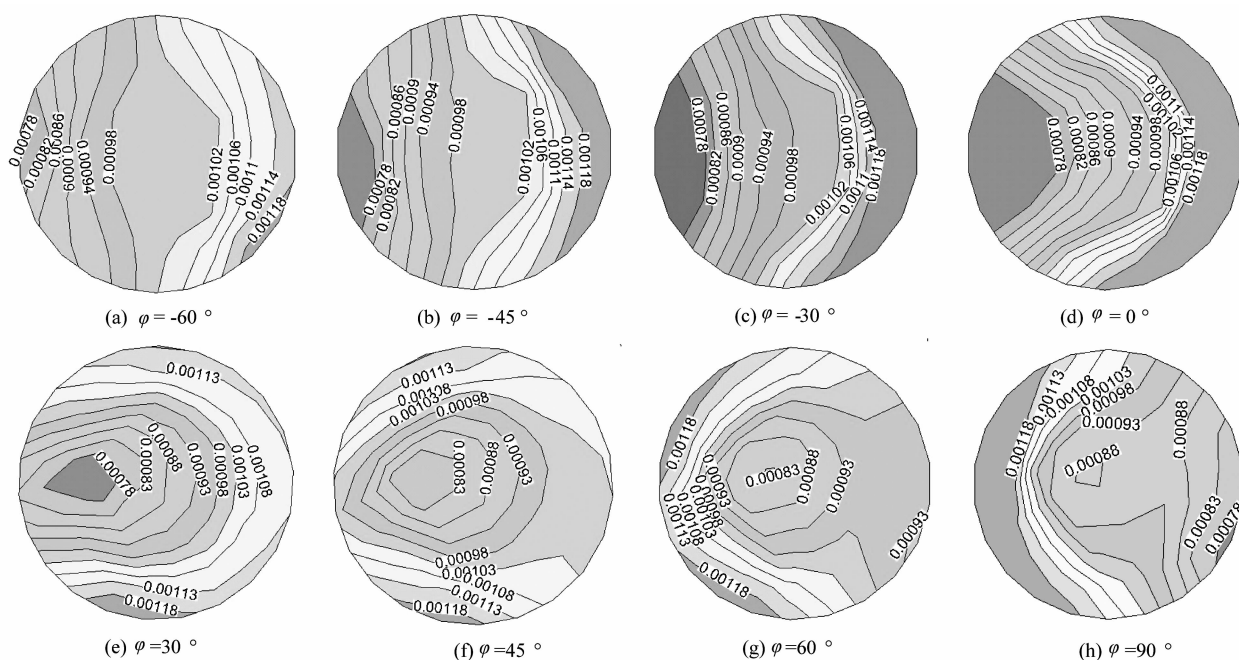


图5 S弯沿流动方向不同截面上烟丝颗粒所占体积率

Figure 5 Particle volume fraction in different sections of S-bend along the flow direction

子浓度低于四周壁面处的粒子浓度,出现环形区域。随着 φ 继续增大,低粒子浓度区域不断向外侧移动,同时高浓度区域不断由上下两侧向内侧移动,在 $\varphi = 90^\circ$ 时内侧粒子体积分数到达最大值也就是磨损最大处。

5 结论

通过应用欧拉双流体模型计算S弯内稀相气固两相流的流动特性,定性分析烟丝颗粒对管道的磨损规律及部位,得出以下结论:

1) 在S弯弯曲段入口,弯管内壁附近的主流速度开始增加,呈现内侧压力小速度大的现象,而外侧则是压力大速度小;在S弯下游管段,压力分布情况则相反即内侧压力大速度小,外侧压力小速度大。

2) 在 $\varphi = 0^\circ$ 截面的外侧和 $\varphi = 90^\circ$ 截面的内侧烟丝颗粒体积分数最大,说明烟丝颗粒在这两个部位对管道的冲刷最严重。

参考文献:

[1] TAYLOR A M K P, WHITELAW J H, YIANNESKIS M. Curved ducts with strong secondary motion: velocity measurements of

developing laminar and turbulent flow [J]. Journal of Fluids Engineering, 1982, 104: 350 - 359.

[2] KLIASFAS Y, HOLT M. LDV measurements of a turbulent air - solid two - phase flow in a 90° bend [J]. Experiments in Fluids, 1987, 5 (2): 73 - 85.

[3] 史峰,徐忠,马材芬.大曲率弯道内湍流数值计算与测量[J].空气动力学学报,1990,8(4):423 - 429.

[4] 丁钰,翁培奋. 90° 弯管内流动的理论模型及流动特性的数值研究[J].计算力学学报,2004,21(3):314 - 321.

[5] 樊洪明,何钟怡,王小华.弯曲管段内流动的大涡模拟[J].水动力学研究与进展,2001,16(1):78 - 83.

[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(4): 559 - 565.

[7] 周艳荣,谢振华. 90° 方截面弯管内气固两相流场的数值模拟[J].西安科技大学学报,2008(1):46 - 50.

[8] 章本照,沈新荣,方建农.矩形截面弯管内气固两相流及对管壁磨损的数值分析[J].空气动力学学报,1995(4):435 - 441.

[9] 柳成文,毛靖儒,俞茂铮. 90° 弯管内稀相气固两相流及固粒对壁面磨损量的数值研究[J].西安交通大学学报,1999,33(9):53 - 57.

[10] YEUNG W S. Erosion in a curved pipe [J]. Wear, 1979, 55(1): 91 - 106.